



# Miljøbelastningar i vegtunnelar

Etatsprogrammet Varige konstruksjonar 2012-2015

STATENS VEGVESENS RAPPORTAR

Nr. 577



**Tittel**

Miljøbelastningar i vegtunnelar

**Title**

Environmental loads in road tunnels

**Undertittel****Subtitle****Forfatter**

Per Hagelia

**Author**

Per Hagelia

**Avdeling**

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

**Department**

Traffic Safety, Environment and Technology Department

**Seksjon**

Tunnel og betong

**Section**

Tunnel and concrete

**Prosjektnummer**

603242

**Project number**

603242

**Rapportnummer**

Nr. 577

**Report number**

No. 577

**Prosjektleder**

Synnøve A. Myren / Alf Kveen

**Project manager**

Synnøve A. Myren / Alf Kveen

**Godkjent av**

Synnøve A. Myren

**Approved by**

Synnøve A. Myren

**Emneord**

Varige konstruksjonar, tilstandsutvikling tunnel, miljøbelastningar i vegtunnelar

**Key words**

Durable structures, existing tunnels, environmental loads in road tunnels

**Samandrag**

Aktiviteten Miljøbelastningar i etatsprogrammet Varige konstruksjonar har fokusert på å skaffe fram ein oversikt over miljølaster som verkar på konstruksjonsmaterialar og tekniske installasjonar i vegtunnelar. Denne rapporten gir ei oppsummering av funn knytta til bergboltar, sprøytebetong som bergsikring, vass- og frostsikringshvelv og installasjonar. Aktiviteten konkluderer med at levetida til konstruksjonane kan aukast dersom ein legg auka vekt på relevant karakterisering av miljølaster og bruker materialar som er betre tilpassa lokale forhold.

**Summary**

The activity Environmental Loads within the R&D program Durable Structures provided an overview of environmental loads on construction materials and technical installations in road tunnels. This report summarises findings relevant to rock bolts, sprayed concrete used for rock support, linings for water and frost protection and technical installations. It was concluded that lifetime of our structures can be increased when putting further emphasis on relevant characterisation of environmental loads, and make use of materials better suited for local conditions.

## Forord

Denne rapporten inngår i en serie rapporter fra **etatsprogrammet Varige konstruksjoner**. Programmet hører til under Trafikksikkerhet-, miljø- og teknologiavdelingen i Statens vegvesen, Vegdirektoratet, og foregår i perioden 2012-2015. Hensikten med programmet er å legge til rette for at riktige materialer og produkter brukes på riktig måte i Statens vegvesen sine konstruksjoner, med hovedvekt på bruer og tunneler.

Formålet med programmet er å bidra til mer forutsigbarhet i drift- og vedlikeholdsfasen for konstruksjonene. Dette vil igjen føre til lavere kostnader. Programmet vil også bidra til å øke bevisstheten og kunnskapen om materialer og løsninger, både i Statens vegvesen og i bransjen for øvrig.

For å realisere dette formålet skal programmet bidra til at aktuelle håndbøker i Statens vegvesen oppdateres med tanke på riktig bruk av materialer, sørge for økt kunnskap om miljøpåkjenninger og nedbrytningsmekanismer for bruer og tunneler, og gi konkrete forslag til valg av materialer og løsninger for bruer og tunneler.

Varige konstruksjoner består, i tillegg til et overordnet implementeringsprosjekt, av fire prosjekter:

- Prosjekt 1: Tilstandsutvikling bruer
- Prosjekt 2: Tilstandsutvikling tunneler
- Prosjekt 3: Fremtidens bruer
- Prosjekt 4: Fremtidens tunneler

Varige konstruksjoner ledes av Synnøve A. Myren. Mer informasjon om prosjektet finnes på [vegvesen.no/varigekonstruksjoner](http://vegvesen.no/varigekonstruksjoner)

Denne rapporten tilhører **Prosjekt 2: Tilstandsutvikling tunneler** som ledes av Alf Kveen. Prosjektet vil skaffe kunnskap om den tekniske tilstanden på tunnelers konstruksjon og utrustning og øke kunnskapen om nedbrytningsmekanismer. Formålet med prosjektet er å utvikle bedre verktøy for tilstandsutvikling, noe som er viktig både for planlegging av drift og vedlikehold av eksisterende tunneler. Prosjektet vil også etablere kunnskap som kan bidra til at fremtidige tunneler bygges og innredes slik at ønsket kvalitet og levetid oppnås.

Rapporten er utarbeidet av *Per Hagelia*, Statens vegvesen.



# Innhald

1	Innleiing .....	2
1.1	Miljøbelastningar .....	2
1.2	Avgrensingar .....	4
1.3	Målsetting for denne rapporten .....	4
2	Oversikt over miljølaster i vegtunnelar .....	5
2.1	Miljølaster som påverkar bergboltar .....	5
2.2	Miljølaster som påverkar sprøytebetong brukt som bergsikring .....	6
2.3	Miljølaster som påverkar vass- og frostsikringshvelv .....	9
2.4	Miljølaster som påverkar tekniske installasjonar.....	10
3	Kva er relevant karakterisering av miljøbelastningar? .....	14
3.1	Generell bakgrunn .....	14
3.2	Situasjonen i dag .....	14
3.3	Samanhengen med sikkerheit og oppetid .....	16
4	Tilrådingar om auka vekt på dokumentasjon av miljøbelastningar .....	18
5	Referansar .....	20

## 1 Innleiing

Etatsprogrammet Varige konstruksjonar (2012–2015) omfattar undersøkingar av alle viktige materialar som blir brukt i tunnelar og bruer i Statens vegvesen:

*«Programmetts hovedmål er å legge til rette for at riktige materialer og produkter benyttes på riktig måte i Statens vegvesen sine konstruksjoner. Formålet er å oppnå ønsket kvalitet, forutsigbart vedlikehold og definert levetid for ulike konstruksjonsløsninger, i første rekke for bruer og tunneler».*

Hensikta har vore å skaffe fram ny kunnskap og bidra til å vurdere om dagens krav til konstruksjonsløyningar er gode nok. Dette er viktig med tanke på å auke levetida for tunnelane og samstundes bidra til betre drift- og vedlikehald for konstruksjonane. Dette vil igjen føre til lågare kostnader.

Varige konstruksjonar – Tilstandsutvikling tunnelar har omfatta følgjande aktivitetar:

- Tilstandsutvikling boltar – Aktivitetsleiar Karen Klemetsrud
- Miljøbelastningar i veggutunnelar – Aktivitetsleiar Per Hagelia
- Tilstandsutvikling vann og frostsikring – Aktivitetsleiar Mona Lindstrøm
- Bestandigheit av sprøytebetong – Aktivitetsleiar Per Hagelia
- Tilstandsutvikling tekniske installasjonar – Aktivitetsleiar Alf Kveen

### 1.1 Miljøbelastningar

Tilstandsutviklinga til konstruksjonsmaterialar i tunnel er avhengig av miljøbelastningane. Tunnelmiljøet er ikkje einsarta, men varierer frå stad til stad. Det er derfor nødvendig å karakterisere miljølastene på ein relevant måte, slik at tilstandsutviklinga i dei ulike konstruksjonsmateriala kan bli forstått.

Auka kunnskap om samanhengar mellom nedbryting og miljøbelastningar er avgjerande med tanke på:

- Å stipulere levetida til dei enkelte konstruksjonsløyningane/materiala, ved å differensiere mellom forskjellige miljølastar som verkar
- Å oppnå mest muleg riktig bruk av materialar, produkt og konstruksjonsløyningar, som er betre tilpassa det lokale tunnelmiljøet

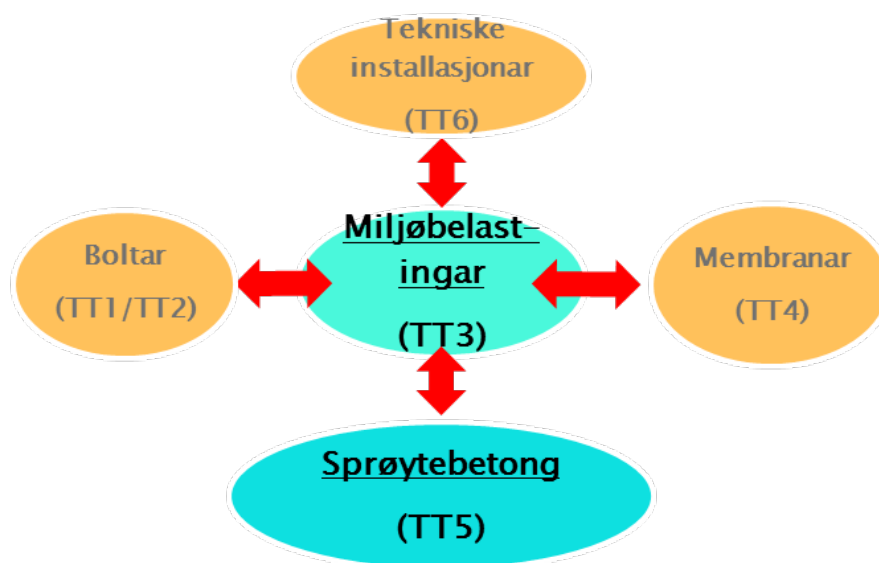
- Å skaffe eit betre grunnlag for bestandigheitsprosjektering, både med tanke på rehabilitering og bygging av nye tunnelar

Hovudmålet med aktiviteten Miljøbelastningar i vegtunnelar har vore å få utført miljøregistreringar og analysar og kople resultatane mot dei respektive konstruksjonsmateriala i dei andre delprosjekta. I startfasen var tanken å skaffe fram miljøanalysar (inklusive vatn, partiklar og luftmålingar) med relevans for *alle* viktige konstruksjonsmaterialar i vegtunnelar:

- sprøytebetong som bergsikring og brannsikring
- kabelbruer
- vifter
- pumper, m.m.

Det viste seg å vere *for* ambisiøst å dekke alle typar materialar på ein fullt ut likeverdig og systematisk måte (sjå kap.1.2). Aktiviteten har lagt vekt på:

- Å få oversikt over betydninga av miljøbelastningar med tanke på bestandigheitsutvikling til konstruksjonsmaterialar i vegtunnelar
- Å skaffe fram relevante prøver og analysar for Bestandigheit av sprøytebetong. Dette utgjorde ein stor del av arbeidet innan miljøbelastningar
- Deltaking i aktiviteten Tekniske installasjonar med vekt på faglege råd om metodikk, samt vurdering av data knytta til miljøbelastningar.
- Å skaffe fram/formidle relevante analysar for aktiviteten Tilstandsutvikling boltar
- Rettleie to masterstudentar innan sprøytebetong om bl.a. miljøbelastningar og tilhøyrande analysemetodikk
- Etablere eit PhD-program med vekt på mikrobiologiske undersøkingar av skadeleg biofilm i undersøkte tunnelar
- Komme med tilrådingar om behov for dokumentasjon av miljøbelastningar knytt til det systematiske tunnelvedlikehaldet



Figur 1 Samanhengen mellom Miljøbelastningar i vegtunnelar og dei andre aktivitetane i Varige konstruksjonar – Tilstandsutvikling i tunnelar.

## 1.2 Avgrensingar

Denne rapporten vurderer ikkje konkret dei konstruktive verknadene av miljølastene. Årsaka er at kvart konstruksjonsmateriale representerer ei særeiga problemstilling, som krev innsikt og praktisk handtering av fagleg spesialkompetanse. *Effektane av miljølastene på konstruksjonsmateriala, med dokumentasjon av miljø og tilstandsutvikling, er derfor vurderte og rapporterte kvar for seg innan dei enkelte aktivitetane.*

Det var i utgangspunktet tankar om å utføre luftmålingar i eit lite utval av tunnelar, for på den måten å skaffe oversikt over potensielle effektar frå partiklar, avgassar m.m. Dette blei likevel ikkje sett i verk. Sikker dokumentasjon om samanhengar mellom luftinnhald og nedbrytingsfenomen ville neppe komme fram, fordi ein treng statistisk gyldige datasett basert på målingar over lang tid, inklusive sesongvariasjonar. Samanhengar mellom nedbrytingsfenomena, som alltid er *lokale*, og luftmålingar ville truleg også kunne bli vanskelege å tolke. Det er i denne samheng verd å merke seg at korrosivitet i tunnelrommet i liten grad er avhengig av gassar (Sandberg mfl. 2001). Luftmålingar er i tillegg svært dyre, og ville gått på bekostning av andre viktige oppgåver innan Tilstandsutvikling i tunnelar.

Det blei sett fram eit alternativ om å kople seg mot rehabiliteringsprosjekt med relevans for tilstandsutvikling i tekniske installasjonar. Tanken var å samle opp støv, skitt og eventuelle lekkasjevatn saman med tilhørande bitar av korrodert materiale, for eksempel frå lokale område med korrosjonsskadar på kabelbruer. Dette ville kunne ha gitt meir direkte innsikt i samanhengar mellom korrosjon og miljøbelastning på lokal skala, analogt med prøvingsfilosofien innan aktiviteten Bestandigheit av sprøytebetong.

Dette blei likevel ikkje sett i verk, på grunn av problem knytta til kapasitet og logistikk. Innan Tekniske installasjonar er det analysert partiklar, slam og vatn frå drensvatn i nokre tunnelar.

Frostproblematikken er ikkje vurdert i Tilstandsutvikling tunnelar.

## 1.3 Målsetting for denne rapporten

Denne rapporten omfattar:

- Oppsummering av miljølaster som påverkar konstruksjonsmateriala i tunnelar, illustrert med arbeid utført innan dei respektive delaktivitetane
- Diskusjon om behov for auke vekt på karakterisering av miljølastar
- Tilrådingar om tiltak som kan gjerast for å reduserer omfanget av skadelege miljølaster i samband med planlegging, bygging og systematiske tunnelvedlikehald



## 2 Oversikt over miljølaster i vegtunnelar

Dette kapittelet gir ein kortfatta oversikt over sentral problematikk knytta til miljølaster som verkar på konstruksjonsmaterialar i vegtunnelar, med vekt på det som er utført innan «Varige konstruksjonar – Tilstandsutvikling i tunnelar» (Statens vegvesen 2016).

### 2.1 Miljølaster som påverkar bergboltar

Aktiviteten Tilstandsutvikling boltar har fokusert på bergboltar og boltemørtel, med vekt på tilrettelegging for undersøkingar av tilstandsutviklinga til boltar i aggressivt miljø over tid. Dette arbeidet fortsetter utover etatsprogrammet Varige konstruksjonar.

Det blei i 2013 etablert eit testfelt for bergboltar i tilknytning til Oslofjord testfelt for sprøytebetong (etablert 2010), og det gamle testfeltet i Vardøtunnelen (vel 30 år) er følgt opp. Begge testfelta er lokaliserte i aggressivt undersjøisk miljø, med til dels sterk vekst av jernoksidierende bakteriar i grøfter, dren og på veggjar mot tunnelrommet. Mesteparten av boltane, inklusive mørtel, er eksponerte for salt grunnvatn. Det er muleg at bakteriell korrosjon kan påverke ytre delar av boltane frå tunnelrommet.

Tabell 1 viser analysar av grunnvatn som er lite eller ikkje påverka av sprøytebetong. Prøve *Oslo 1* (= prøve «Field 1–2016», Hagelia 2016b), samla frå rask drypplekkasje gjennom sprøytebetong i hengen, har Ca = 540 mg/l. Dette er høgare enn typisk sjøvatn (ca. 410 til 420 mg/l), og truleg noko påverka av betongen. Prøve *Oslo 2* (= Prøve «V5–2004», Hagelia 2011a) av vatn frå ein sprekk i bart berg omkring 50 meter unna testfeltet har Ca = 442 mg/l, som er marginalt høgare enn typisk sjøvatn. Begge grunnvassprøvene liknar på sjøvatn, både med tanke på pH (svakt basisk) og saliniteten (Cl, Mg og sulfat), men har meir oppløyst jern, mangan og ammonium.

Tabell 1 Kjemisk samansetning av grunnvatn ved Oslofjord- og Vardø testfelt for bergboltar.

Testfelt	pH	Cl <sup>-</sup> g/l	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> g/l	Mg <sup>2+</sup> g/l	Ca <sup>2+</sup> mg/l	Na <sup>+</sup> g/l	K <sup>+</sup> mg/l	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	TOC mg/l	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Mn <sup>2+</sup> mg/l	Fe <sup>2+</sup> mg/l
Oslo 1	7,6	19,0	2,6	1,2	540	9,5	310	146	–	1,1	<50	1,7	< 0.001
Oslo 2	7,9	18,6	2,58	1,24	442	9,06	318	150	0,38	1,71	0.006	1,21	1,97
Vø 1	5	24,6	2,16	1,51	910	–	–	–	–	–	–	–	–
Vø 2	7,8	17,8	2,10	–	2350	9,2	–	–	1,1	–	–	0,026	0,22
Sjøvatn Oslofjord	7,74	18,6	2,63	1,37	413	10,8	390	144	1,2	<0,005	0,146	0,006	0,023

Analysane frå Vardøtunnelen viser eit litt anna bilde. Prøve Vø 1 i tabellen (= prøve pel 1940 frå Smeplass 1987) er surt (pH = 5), har svært høgt Cl (hypersalin), høgt Ca og litt lågt sulfatinnhald samanlikna med sjøvatn. Dette vatnet blei i følgje Smeplass (1987) samla frå ein lekkasjesprekk bak sprøytebetong, og var ikkje rekna som påverka av betong. Det er likevel utført injeksjonsarbeid på denne staden (Graarud og Nilsen 1987): høgt Ca kan derfor tyde på utvasking av injeksjonsmasse. Årsaka til låg pH er ikkje klarlagt, men er likevel ofte observert i tilknytning til område med vekst av rusta biofilm. I følgje Asplan (1985) er det

identifisert H<sub>2</sub>S gass i slike område. H<sub>2</sub>S vil oksidere til svovelsyre når luft trenger inn i biofilmen. Vø 2 representerer gjennomsnitt av to analysar som (pel 1850 og pel 2020 omkring testfeltet, Asplan 1985). pH er svakt basisk og saliniteten er litt lågare enn sjøvatn. Ca er derimot ekstremt høgt. Rapporten seier ingenting om kor desse prøvene er samla, men sett under eitt så liknar Vø 1 og Vø 2 mest på vatn som er påverka av nedbroten sprøytebetong i kontakt med skadeleg biofilm (sjå Hagelia 2011a).

Tilgjengelege kjemisk analysar tyder på at eksponeringsforholda ved dei to testfelta ikkje er heilt like. Ein bør følgje opp Vardøtunnelen med nye og meir komplette analysar av vatnet på staden. For Oslofjorden testfelt er det planlagt vidare kjemiske analysar av lekkasjevatt omtrent kvart år fram til 2020. Bakgrunn og resultat frå dei to testfelta er rapporterte av Klemetsrud (2016a, 2016b).

Det er vidare analysert for skader og tilløp til korrosjon på galvaniserte og pulverlakkerte sikringsboltar og bergboltar utsprengt i samband med tunneloppgradering (bl.a. i Bømlafjord- og Førres-tunnelen).

Når det gjeld utsprengte sikringsboltar er statistikken svært avgrensa. Generelt kan ein seie at spaltekorrosjon opptre i gjengeseksjonen til boltane. Denne delen av boltane stikker ut frå tunnelveggen og er såleis eksponert for klimaet mellom vass- og frostsikring og bergveggen. Ein spesiell situasjon bør likevel nemnast: I den undersjøiske Bømlafjordtunnelen blei det konstatert at ein galvanisert og pulverlakkert sikringsbolt i svært grafitt-holdig berg (edelt!) ikkje hadde vesentlig korrosjon (Lewin 2015).

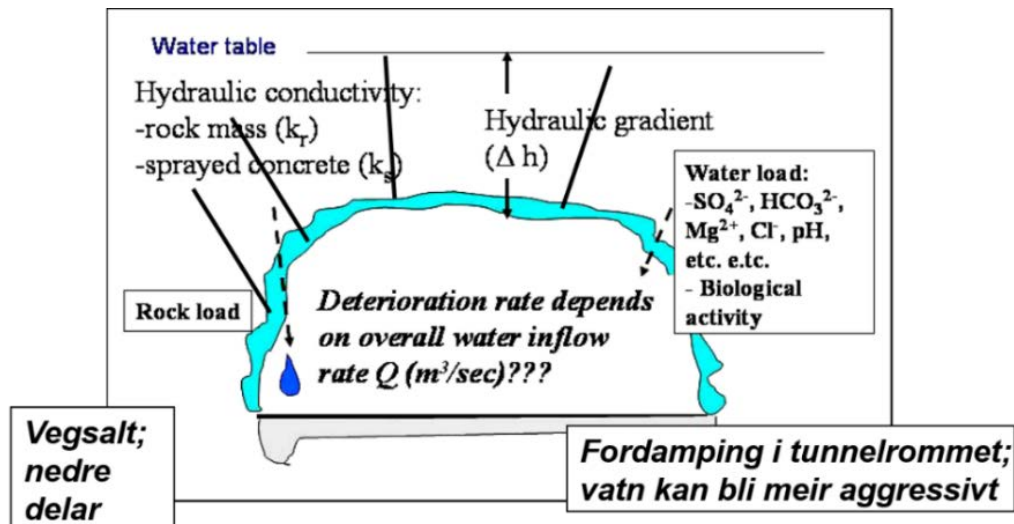
Korrosjonsproblematikk knytta til bl.a. bergboltar i tunnel er også behandla av Knudsen (2015), som også gir fleire tilrådingar om riktig materialbruk.

*Bergboltar som er gyste, galvaniserte og pulverlakkerte vil ha svært lang levetide. Desse boltetypane er tilpassa dei fleste miljølaster så lenge dei blir monterte forskriftsmessig og elles er uskadde ved handtering*

## 2.2 Miljølaster som påverkar sprøytebetong brukt som bergsikring

Sprøytebetong brukt som bergsikring i tunnelar er påverka av svært mange variablar, og langt fleire enn brubetong (Figur 2.3). Desse er:

- Grunnforhold (hydrogeologi, bergmassestabilitet, mineralstabilitet, vasskjemi, biofilm)
- Forhold i tunnelrommet (fuktnivå, fordamping, tinesalt, partiklar, eksos, m.m.)
- Materialeigenskapar (betongresept, styrke, E-modul, tykkelse, hefteigenskapar.)



Figur 2 Miljølaster som påvirker levetida til sprøytebetong i vegtunnelar (Hagelia 2008a,b).

Effektane av dei varierende grunnforholda på tilstandsutviklinga til sprøytebetong er behandla i oppsummeringsrapporten frå aktiviteten Bestandigheit av sprøytebetong (Hagelia 2016a). Effektar av nedbryting på sprøytebetong med ulike reseptar og tykkelse er undersøkt frå fire Eksponeringsklassar, definert i betongstandarden (NS-EN 206):

- Ferskvassmiljø (XC2, X0)
- Svakt svovelsurt miljø (XC2, XA1)
- Alunskifermiljø (XC2, XSA)
- Undersjøisk miljø (XC2, XS2, XA3), med og utan skadeleg biofilm

Det er også lagt vekt på å undersøke grad av nedbryting av sprøytebetong med god og dårleg heft, samt effekt av variasjonar i hydrogeologiske miljø. Arbeidet bygger på eit utval godt dokumenterte tunnelar frå tidlegare prosjekt, inklusive etatsprogramma Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar (Davik 1997), Vegkapital – tunnel (Statens vegvesen 2006), Moderne vegtunnelar (Statens vegvesen 2012) og resultat frå eit doktorgradsarbeid (Hagelia 2011), og nye detaljerte undersøkingar utført av Mannvit AS, i Gruatunnelen, Baneheiatunnelen, Ekeberg-/Svardalstunnelen, Flekkerøytunnelen, Sløverfjordtunnelen og Frøyatunnelen. Hovudresultata frå Mannvit er oppsummerte av Wigum (2016). Det er også utført to masteroppgåver innan sprøytebetongprosjektet (Fjose 2015, Gulland 2015).

Resultata frå Oslofjord testfelt for sprøytebetong, inklusive med fem års testresultat, er presentert i eigen rapport (Hagelia 2016b). Arbeidet viser at auka vekt på karakterisering av miljøbelastningar gir eit betre grunnlag for å vurdere tilstandsutviklinga til sprøytebetong.

#### Grunnforhold – hovudkonklusjonar:

- Tilgangen på aggressivt lekkasjevatn varierer avhengig av hydrogeologiske forhold, og er styrt av hydraulisk konduktivitet i bergmassen (oppsprekking) og vasstrykk (hydraulisk gradient).

- Aggressivt grunnvatn i alunskifermiljø og undersjøisk miljø har nokre stader ført til begynnande tydeleg nedbryting av sementlimet, men sprøytebetongbergsikringa fungerer stort sett etter hensikta fram til vel 25 års alder.
- I alunskifer og anna sulfidførande bergmasse vil miljøbelastninga auke på grunn av permanent senking av grunnvatnet. Sigevatnet over grunnvassnivået er oksygenrikt fører til at det dannast sulfat og svovelsyre (geokjemiske årsaker).
- Stålfiberkorrosjon er eit mykje mindre problem enn tidlegare antatt, sjølv der det er registrert inntrenging av klorid i undersjøisk sprøytebetong.
- Biofilm med ein viss type jern- og manganoksiderande bakteriar fører til akselerert nedbryting av sprøytebetong i nokre undersjøiske tunnelstrekningar. Ein bør merke seg at betongstandarden ikkje omtalar biofilm, dvs. det finst ikkje definerte eksponeringsklassar for denne type biologisk nedbryting. Biofilm opptreer bl.a. i alunskifermiljø, men effekten der er ennå ukjent.
- Andre stader er effekten av nedbryting liten eller fråverande, og det er grunn til å tru at riktig utført sprøytebetong i ferskvassmiljø vil kunne oppnå 100 års levetid.
- Ustabil bergmasse kan føre til mikro-opprissing av sprøytebetongen og høgare permeabilitet. Eventuelle effektar er vanskeleg å avdekke utan betre dokumentasjon av bergmassen kanskje særleg i tida rett etter sprøyting medan berget «setter seg»

#### Forhold i tunnelrommet – hovudkonklusjonar:

- Eksos m.m. fører til litt meir omfattande karbonatisering i sprøytebetongoverflata ved direkte eksponering, samanlikna med sprøytebetongen bak vass- og frostsikringshvelv
- Kloridinntrenging på grunn av tinesalt påverkar i større eller mindre grad dei nedste 1–2 meterane over vegbanen.
- Fordamping i tunnelrommet fører i blant til auka ionestyrke (opptil 10x er målt nær tunnelvifter). Dermed kan vatn som i utgangspunktet er lite aggressivt bli svært aggressivt.
- Eksponeringsmiljøet i tunnelrommet har hittil ikkje ført til merkbar nedbryting av sprøytebetong brukt som bergsikring.

#### PhD-program innan biofilm/mikrobiell nedbryting av betong

I aktiviteten Miljøbelastningar i vegtunnelar blei det lagt ned eit stort arbeid med å få etablert eit PhD-program for mikrobiologiske undersøkingar av skadeleg biofilm i undersjøiske tunnelar. Det har i dei siste åra vore forska mykje internasjonalt på biokorrosjon og nedbryting av betong. Biologisk aktivitet fører i bestemte tilfelle til rask nedbryting av bl.a. stål og betong. Arbeid utført av Statens vegvesen har vist merkbar nedbryting av sprøytebetong og stålfiberkorrosjon i kontakt med biofilm i nokre undersjøiske tunnelar (Hansen 1996, Hagelia 2007, 2011, 2013). Men det er også registrert eksempel på tilsynelatande ikkje-skadeleg biofilm. I tillegg har Statens vegvesen lenge hatt problem med tetting av dren i undersjøiske tunnelar på grunn av akkumulasjon av mikroorganismar (Davik 1997b).

Det er behov for å kunne skilje mellom skadeleg og ikkje-skadeleg biofilm samt auka kunnskap om årsakene til bioakkumulasjon generelt. I 2015 blei det starta opp eit

doktorgradsprogram med vekt på skadeleg biofilm på sprøytebetong i undersjøiske tunnelar (Vedlegg 1). Arbeidet omfattar identifikasjon av alle involverte mikroorganismar ved moderne DNA teknikkar, og vil kaste lys over biokjemiske reaksjonar som fører til nedbryting av sprøytebetong og fiberarmering. Grunnforskning av dette slag er nødvendig for å finne mottiltak. PhD-student Sabina Karačić held til ved Chalmers i Gøteborg og arbeidet blir finansiert av samarbeidsprosjektet mellom Chalmers og Statens vegvesen. Første fagartikkel frå dette arbeidet blei presentert i RILEM TC 253-MCI Microorganisms–cementitious materials interactions i Delft – Nederland i juni 2016 (Karačić mfl. 2016).



*Figur 3 Mikrobiologisk prøvetaking gjennom biofilm og ytre del av sprøytebetong i Oslofjordtunnelen, utført av Chalmers Gøteborg. Foto: Statens vegvesen.*

*Stålfiberarmet sprøytebetong brukt som bergsikring har lang levetid dersom ein legg auka vekt på at respektar, utførelse og design er tilpassa dei lokale bergtekniske, geologiske, kjemiske og biologiske miljøbelastningane*

## 2.3 Miljølaster som påverkar vass- og frostsikringshvelv

Varige konstruksjonar har utført systematiske undersøkingar av fleire typar vass- og frostsikringsløysingar i tunnelar. Ein har vurdert effektar frå:

- Ferskvassmiljø
- Undersjøisk miljø
- Trafikk

Tunnelduk, platehvelv og hvelv av membran og sprøytebetong som brannsikring er undersøkt av Rønneberg og Østmoen (2016). Det blei ikkje utført analysar av vasskjemi. Resultata viser at vass- og frostsikttings-løysingane tilfredsstiller funksjonskrava. Ein har likevel konstatert varierende svekka materialeegenskapar over tid i følgjande samanhengar og miljø:

- Festeboltar/festsystem og korrosjonsbeskyttelse på platehvelv – i saltvassona i undersjøiske tunnelar
- Tunnelduk og membranar – i både ferskvatn og saltvatn
- Festesystema for lette hvelv (tunnelduk) er skadd på grunn av trafikkbelastningar (trykk og sugkrefter)

I Nestunnelen på E16 bidrog dynamiske laster på vass- og frostsikring til auka opprissing i tynn brannsikring av stålfiberarmert perlittbetong (Holm 2011). Tunnelen blei stengt i nesten tre år på grunn av ekstrem avskaling, og nedfall med skade på bil. Detaljerte analysar innan Varige konstruksjonar viste at den kraftige avskalinga hadde komplekse årsakar og omfatta svekking av betongen ved sprenging av natriumsulfat; kraftig utluting ved syreangrep; svært omfattande karbonatisering og destruktiv stålfiberkorrosjon. Sulfatet var danna internt i sprøytebetongen frå SO<sub>2</sub>-gass i perlitt, medan natrium stammar frå vassglas akselerator og tinesalt. Varierende temperaturforhold i tunnelen, oppfukting-uttørking, fryse-tine syklar og trykk/sugkrefter frå trafikken resulterte i langvarig sprengande effekt frå natriumsulfatet, og var truleg også årsaka til problem med perlittbetong i andre tunnelar (Hagelia 2015, 2016c).

## 2.4 Miljølastar som påverkar tekniske installasjonar

I tunnelar med moderne vass- og frostsikring kan ein grovt dele miljøbelastninga i to kategoriar:

- Miljøbelastning i trafikkrommet
- Miljøbelastning med innverknad frå berggrunn og lekkasjevatt

Miljøbelastninga er alltid ein kombinasjon av fuktnivå, vasskjemi og partikkeleigenskaper. Derfor varierer miljøbelastninga frå stad til stad. Den totale miljøbelastninga er spesifikk for kvar enkelt tunnel.

### Trafikkrommet:

I trafikkrommet kan ein generelt rekne med at miljøet/korrosjonsforholda ikkje blir påverka av berggrunnen omkring, og heller ikkje av kjemien i vatnet som lekker inn i tunnelen. Dei forholda som påverkar miljøet i trafikkrommet er i hovudsak knytta til støv-problematikk og fukt. Støvkjeldene er prinsipielt delt i to kategoriar:

- Støv generert i tunnelen av trafikken, dvs. slitasjestøv frå asfalt og kjøretøy
- Støv, salt og fukt som følger med trafikken frå utsida av tunnelen og vask

### Berggrunn og lekkasjevatt:

I rommet mellom berg og vass- og frostsikringa er det generelt eit svært fuktig miljø. I denne sona vil lekkasjevattnets kjemi kunne gi veldig store endringar i det lokale miljøet og i korrosjonsforholda over svært korte avstandar. Forholda i og nær pumpeump har vanlegvis høgast fuktnivå. Her vil miljøbelastninga ofte vere høg og meir konstant.

### Støv og korrosjon i tunnelrommet:

Det mest viktige når det gjeld korrosjonsforhold i trafikkrommet er vatn, fukt, vegsalt og oppløyste ion. I enkelte tunnelar er det også bidrag frå korrosivt støv knytta til industrirelatert yrkestransport.

Sandberg mfl. (2001) konkluderer som følgjer: «*Korrosiviteten i vegtunnelar är hög och detta beror främst på kombinationen salting och smuts. Gasformiga föroreningar har en marginell inverkan.*»

Ein stor del av tunnelstøvet blir liggande på alle slags installasjonar i trafikkrommet. Dette støvet trekker til seg fukt frå vatn og fukt i tunnelrommet. Vatnet og fukta fører alltid ion, og ionekonsentrasjonen varierer avhengig av tilgang på salt m.m. I tillegg vil kjemikalier frå eksosgassar i nokon grad bli adsorberte til støvet. I tørre periodar fordampar det adsorberte vatnet, noko som fører til veldig sterk oppkonsentrasjon av de adsorberte ion, endring av pH og tilhørende betydeleg forverring av dei lokale korrosjonsforholda.

Det føregår nå eit lokalt prosjekt i Karmøy-tunnelen som fokuserer på partikkelstorleik og kjemi i vatn og sediment frå slamutskillar. Rapport ventast ferdig innan utgangen av 2016.

Støv i tunnel representerer eit relativt stort problem med tanke på tilstandsutvikling, og det er muleg å minske eller fjerne problemet med systematisk vasking.

*Hyppig tunnelvask er eit godt praktisk tiltak mot korrosjon, og som vil gi auka levetid av tunnelinstallasjonane. Det er særleg behov for vask rett etter at vintervegsaltinga er avslutta.*

### Opphengsboltar i tunnelar:

Generelt er «dualcoated» boltar med intakt plastlag svært robuste i forhold til alle miljøvariasjonar i tunnelar.

I nokre tilfelle er det rapportert kombinasjon av utmatting og korrosjon, med et rett brot rett utanfor bergveggen i festeboltar, blant anna i Bømlafjordtunnelen (Lewin 2015). Det er observert svært få slike brot i forhold til det totale talet på innsette boltar. Figur 4 viser eksempel på korrosjon i overgangen til berg i Hvalertunnelen. Her vil lokale miljøforhold som saltinnhald, pH og tilgang på oksygen spele en betydelig rolle. Dette fører til at bolten i overgangen frå luft til berg representerer eit galvanisk element (Knudsen 2016).



*Figur 4 Opphengsbolt for vass- og frostsikringshvelv i undersjøisk miljø i Hvalertunnelen (Bye TI & Kynningsrud HR (2015). Korrosjonen er konsentrert i overgangen til berg.*

#### Tunnelvifter, pumper, m.m.:

Varige konstruksjonar har samband med aktiviteten «Tilstandsutvikling tekniske installasjonar» utført eit omfattande arbeid med tanke på korrosjon og annan skade på tunnelvifter. Følgjande tunnelar er undersøkt: Bømlafjordtunnelen, Karmøytunnelen, Mastrafjordtunnelen, Fløyfjelltunnelen og Førrestunnelen. Det meste er utført av Carl Lewin, Cacon på oppdrag frå Statens vegvesen – Region vest (eksempel på analysar i Vedlegg 2).

Viktige nye erfaringar er ført vidare innan delprosjektet «Fremtidens tunneler – Gode løysningar» og oppsummert i eigen rapport i Varige konstruksjonar (Hofseth 2014). Rapporten omhandlar riktige løysingar og er utforma på ein praktisk og grei måte. Det er blant anna konstatert at pumper ofte må skiftast ut, fordi dei ikkje varer like lenge som spesifikasjonen tilseier.

*Det bør vere muleg å oppnå lengre levetid for vifter og pumper dersom ein kjenner til korleis tunnelmiljøet påverkar dei materialtekniske eigenskapane, samt vel materialar som er tilpassa dei lokale forholda*

#### Mikrobiell korrosjon:

I fleire undersjøiske tunneler er det rapportert viktige utfordringar knytta til raskt veksande biofilm dominert av jernoksidierende bakteriar. Framveksten av bakteriekulturane er sterkt påverka av lokale miljøforhold.

Det er særleg to forhold som er viktige i samband med tekniske installasjonar i tunnel:

- Ei kraftig oppblomstring av rustholdig slimete sekret som tettar drenering og dreneringsrør
- Bakteriane hentar energien sin ved oksidasjon av  $\text{Fe}^{2+}$  til  $\text{Fe}^{3+}$ . De er rapportert betydeleg korrosjon av jern og stål knytta til slike bakteriekoloniar



Bakteriekulturane er bl.a. avhengig av tilførsel av (sjø-)vatn med eit lågt innhald av oksygen, saman med tilførsel av CO<sub>2</sub> for å sikre vekst og formering. Det er også påvist at mangan-oksiderande bakteriar fører til korrosjon av stål (Dickson mfl. 1997, Hagelia 2011).

Mikrobiell korrosjon er eit forholdsvis nytt forskingsfelt, og det er først i dei seinare åra at DNA-teknikkar har blitt tatt i bruk. Nye analysar utført av Sabina Karačić ved Chalmers (Karačić mfl. 2016) viser at bakteriekulturane er komplekse og samansette av svært mange mikroorganismar: Den dominerande jernoksiderande bakterien i Oslofjordtunnelen er *Mariprofundus ferrooxidans*, (arten blei først oppdaga i 2007!) dvs. ikkje *Gallionella* som tidlegare antatt (bl.a. Hagelia 2011). Ein bør vere merksam på at det er uråd å skilje mellom desse to basert på visuelle trekk i mikroskop aleine (begge har helix-forma utvekstar). Dei fleste mikroorganismar i tunnelbiofilm er knapt muleg å identifisere utan moderne DNA-teknikkar.

*Gallionella* -liknande bakteriar er tidlegare observert i bl.a. Ålesundstunnelane Oslofjordtunnelen, Freifjordtunnelen, Flekkerøytunnelen (Hagelia 2011) og Karmøy-tunnelen (C. Lewin, Vedlegg 2). Men det er nå sannsynleg at det like gjerne dreier seg om *Mariprofundus*. Det er også påvist at jernoksiderande hylsebakteriar, sannsynlegvis *Leptothrix ochracea*, dominerer i grøftevatn/dren i Oslofjordtunnelen (Hagelia 2011), som fører til kraftig oppblomstring og tetting av dreinsrør: Hylsebakteriar krev meir oksygen og ser derfor ut til å dominere i grøfter og dren.

Frå Ålesundstunnelane (opna i 1987) er det rapportert at bakterieveksten minka etter nokre år, og ikkje lenger representerer eit problem. Men i Oslofjordtunnelen (opna i 2000) er dette fortsatt problem med drenering og tetting av rør, noko som også ser ut til å bli et problem i Karmøytunnelen (opna i 2013, sjå Vedlegg 2). Mikrobiologien i tunnelar er kompleks og har store variasjonar. Det vil vere uråd å forstå livssyklusane deira utan ei djupare forståing av kompleksiteten for å avdekke utviklinga deira over tid (Hagelia 2013).

Oksidasjon av oppløyst jern (Fe<sup>2+</sup>) og -mangan (Mn<sup>2+</sup>) er uansett svært viktige energikjelder for korroderande mikroorganismar. Det er påvist at stål-armering, inklusive stålfiber i sprøytebetong, fører til oppblomstring av biofilm, men i fleire tilfelle er også Fe og Mn tilgjengeleg frå grunnvatnet (geologisk opphav). Vi kan heller ikkje generelt sjå bort frå at Fe- og Mn-rik biofilm utfelt på sprøytebetong delvis kan vere forårsaka av korrosjon på ubeskytta bergboltar, samt lokalt jernrike mineral eller malm i bergmassen.

Det er utvilsamt hensiktsmessig å endre det lokale miljøet i områda med skadeleg bakterievekst for å stanse utviklinga av rustholdig - korroderande slam som tærer på dei tekniske installasjonane. I samband med drift og vedlikehald vil det vere viktig å lokalisere kjeldene til jern, mangan og andre vekstfremjande emne.

Mikrobiell korrosjon er også omtalt av Knudsen (2015).

*Mikrobiell aktivitet og bioakkumulasjon fører til akselerert korrosjon og tetting av dren. Ein bør i kvart enkelt tilfelle vurdere korleis ein kan fjerne biomasse, samt vurdere konsekvensane mht. tekniske installasjonar.*

## 3 Kva er relevant karakterisering av miljøbelastningar?

### 3.1 Generell bakgrunn

Miljøbelastningar påverkar konstruksjonsmateriala i ulik grad og på ulik måte. Eit og same konstruksjonsmateriale vil kunne vere bestandig i nokre miljø og bli svekka ved korrosjon eller anna nedbryting under andre forhold.

Undersøkingar i fleire FoU-prosjekt har vist at vegtunnelar ofte krev omfattande rehabilitering bare innan relativt få år. Fellesnemnaren er konstruksjonsmaterialar som ikkje held mål, og som til dels skapar eit vedlikehaldsetterslep.

Ein kvar tunnel har sitt særpreg med tanke på lengde, ÅDT, ventilasjon, grunnvassmiljø, hydrogeologi, frostinntrenging, sprøytebetongresept, vass- og frostsikringsløyning, tekniske installasjonar, utførsle og ikkje minst vedlikehaldstilstand. I sum betyr dette at miljølastene ofte er såpass variable at det er vanskeleg å trekke ut det essensielle, med mindre ein har utført ei nærmare karakterisering av miljølastene lokalt.

Den som har ansvar for tunnelvedlikehaldet, og bestemmer når det er behov for rehabilitering, bør bygge prioriteringane sine på samanhengar mellom tilstandsutvikling og miljøbelastningar i kvar enkelt tunnel. Dette vil også kunne kaste lys over kva som kan gjørast betre. Levetidsundersøkingar som har som mål å finne riktig tidspunkt for rehabilitering (dvs. budsjettmessige konsekvensar) er avhengig av kunnskap om årsakssamanhengar.

*Erfaringane viser at Statens vegvesen bør skaffe fram systematisk dokumentasjon av dei lokale miljølastene. Det vil generelt vere ein fordel å redusere, og om muleg eliminere, alle skadelege miljøbelastningar i planleggingsfase, byggefase og driftsfase*

### 3.2 Situasjonen i dag

Gjennomgangen i aktiviteten Miljøbelastningar i vegtunnelar har vist at det ofte er liten kunnskap om miljøbelastningane som faktisk finst i dei enkelte tunnelane. Følgjande miljø er ofte rapportert for vegtunnelar:

- Om tunnelen er lokalisert i saltvatn, ferskvatn og alunskifer.
- Frostsoner
- Støv og avgassar med vekt på HMS og trafikk

Undersøkingar i Varige konstruksjonar og tidlegare prosjekt viser at kunnskapen om nedbrytingsmekanismar i ulike materialar og miljø er god. Men det er likevel vanskeleg å få sett all denne kunnskapen ut i livet utan systematisk innsamling av data over tid. I samband med tunnelforvaltninga er det behov for auka vekt på:

- Kor i dei enkelte tunnelane innverknaden frå miljølastene på konstruksjonsmateriala har vore mest merkbare.

- Kjemisk analyse av vatn og partiklar som er i direkte kontakt med alle slag konstruksjonsmaterialar
- Effektar av fordamping, og særleg innverknaden på konstruksjonsmaterialar som er eksponerte for hypersalint vatn i tunnelrommet

I tillegg til data som er samla inn i Varige konstruksjonar har etatsprogrammet NORWAT (2012–2016) nyleg utført analysar av tunnelvaskevatt og anna avrenningsvatn frå mange tunnelar (Statens vegvesen 2016b). Det er elles viktig å ikkje gløyme tidlegare prosjekresultat. Analysar av tunnelluft og partiklar i fleire tidlegare prosjekt (bl.a. Myran 1985, Andersen mfl. 1995, Hedalen 1995), samt effektar av støvreinseanlegg og ventilasjonsfar (eksempelvis Drangsholt 2001, Sørlie og Tønnesen 1990) seier mykje om miljøbelastningane og er svært relevante. Biblioteket i Vegdirektoratet har mange rapportar om tunnelluft og partiklar som har varig verdi med tanke på handtering av miljøbelastningane i tunnelrommet. Elles finst det mykje viktig kunnskap frå tidlegare FoU-prosjekt, rådgjevingssoppdrag og rehabiliteringsprosjekt.

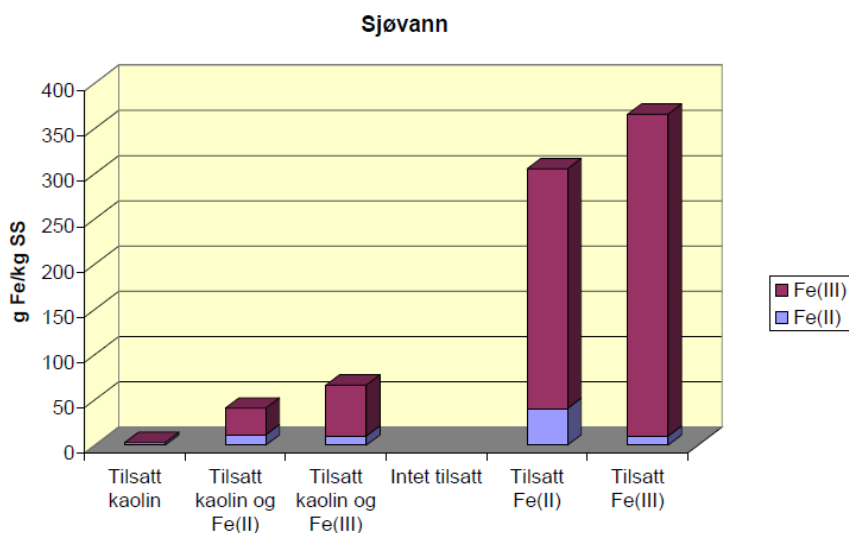
#### Geologiske forhold:

Miljøbelastningane på konstruksjonsmateriala varierer også i forhold til geologiske forhold. For eksempel:

- Innlekkasje av salt grunnvatn i undersjøiske tunnelar minkar med tida, men reduksjonen er ikkje like stor over alt (Davik 1997).
- Innlekkasje til undergrunnsanlegg i alunskifer m.m. kan lokalt føre til at forsuring av vatn aukar over tid (Bastiansen mfl. 1957).

Ved å undersøke bergmassen med vekt på utfellingsreaksjonar og andre tettemekanismar i eit utval tunnelar i forskjellig geologi vil det vere muleg å komme fram til årsakene til endringar i den totale miljøbelastninga frå lekkasjevattnet. Det bør etter kvart vere realistisk å kunne skilje mellom tunnelprosjekt som gir «rask» og «sakte» reduksjon mht til innlekkasje.

Undersjøiske tunnelar: Den totale innlekkasjen (miljøbelastninga) i nokre undersjøiske tunnelar minkar etter få år, medan andre undersjøiske tunnelar er utsett for nokså lik miljøbelastning over mykje lenger tid. Vi veit derimot lite konkret om kva som skil dei enkelte tunnelane. Årsakssamanhengen er likevel utan tvil knytta til utfellingsprosessar på vassførande sprekkesystem. Etatsprogrammet Miljø- og samfunnstjenlige tunneler, 2000–2003 (Lindstrøm og Kveen 2004) initierte eit delprosjekt om naturleg tetting. Effektar av kjemiske utfellingar, avleiringar, leirsvelling og mikrobiologiske/biologiske forhold blei undersøkt. Prosessen blei undersøkt systematisk under kontrollerte forhold i laboratoriet med ferskvatt og saltvatn under varierende redoksforhold. Det blei påvist at utfelling av treverdig jern (Figur 5), men også barytt (bariumsulfat) og manganoksid er blant sannsynlege årsaker til naturleg tetting (Hem mfl. 2003).



Figur 5 Jernutfelling i slamfasen etter laborietest med sjøvatn. Eksempel på tetteprosess (Hem mfl. 2003).

Tunnelar i alunskifer. Senking av grunnvatnet fører til auka potensial for sulfidoksidasjon i alunskifer og anna sulfidførande bergmasse, og dermed auka sulfatinnhald og forsuring i lekkasjevattet. Sulfidoksidasjon fører også til auka mobilisering av tungmetall. Effekten er velkjent, med auka nedbrytingsfart på betong og stål. Alunskiferkomiteen tilrådde at ein unngår senking av grunnvatnet, særleg i alunskifer utan bufferevne mot senking av pH (Bastiansen mfl. 1957). I moderne vegprosjekt nyttast forinjeksjon for å motverke langsiktig skade på bergsikring, og mindre innlekkasje gir også forlenga levetid for tekniske installasjonar.

Betydning av utfelling og oppløysing på heftsona. Det er observert syrepåverknad og resulterande avskalingar langs heftsona mellom sprøytebetong og alunskifer. Dette viser at oksidasjon frå tunnelrommet også har ein viktig effekt. Sjølv om god heft og auka sprøytebetongtykkelse ser ut til å motverke denne effekten er det ennå uklart om syreverknaden på heftsona med tida kan få større omfang.

Undersjøisk miljø har potensielt ein motsett innverknad, ved at (kalsiumkarbonat og/eller magnesiumhydroksid) utfellingar på heftsona mot salt grunnvatn i alle fall delvis ser ut til skjerme sprøytebetongen mot vidare nedbrytande påverknad (Hagelia 2016a).

*Kunnskap om dei hydrogeokjemiske forholda i oppsprukken bergmasse og på heftsona mellom bergmasse og sprøytebetong vil kunne gi eit betre grunnlag for optimal dimensjonering av både bergsikring og tunnelinstallasjonar i plan- og byggefasen*

### 3.3 Samanhengen med sikkerheit og oppetid

Miljøbelastningar i vid forstand påverkar både sikkerheit og oppetid i tunnelar. Prosjektet *Vegkapital, Optimal drift- og vedlikeholdsinnsetning – Tunnel* (Buvik m.fl., 2006) undersøkte viktige samanhengar.

Det er særleg a) manglande reinhald, b) mangelfull vass- og frostsikring og c) mangelfull stabilitetssikring som kan knytast til skader på grunn av miljøbelastningar over tid. Det er her snakk om støv og smuss samt annan potensielt nedbrytande verknad frå vatn. Det går fram av analysen utført i prosjektet Vegkapital – tunnel at manglar som følgje av slike miljøbelastningar kan føre til redusert sikkerheit og redusert oppetid.

Etatsprogrammet Varige konstruksjonar har lagt eit nytt grunnlag med tanke på å forstå korleis varierende miljøbelastningar kan svekke stabilitetssikring, vass –og frostsikring, og tekniske installasjonar, og dermed påverke trafikkforholda i vegtunnelar.

## 4 Tilrådingar om auka vekt på dokumentasjon av miljøbelastningar

I det tidlegare etatsprogrammet «Vegkapital – Drift og vedlikehold tunnel» var ein av konklusjonane som følgjer (Buvik m.fl. 2006):

*«For å oppnå optimal drift og vedlikehold må de ansvarlige ha kjennskap til hvilke faktorer som har størst påvirkning på tilstandsutviklingen og hvilke tiltak som må prioriteres høyst for å oppnå de resultater som bevarer tunnelkapitalen»*

*«Beslutninger i plan- og byggefasen bestemmer i stor grad den etterfølgende drift- og vedlikeholdsinnsetningen»*

Det blei i denne samanhengen peika på behov for utvikle klare kriterier for bedømming av tilstandsutvikling. Dette omfattar:

- Behov for rutinemessig innhenting av miljødata innan det systematiske tunnelvedlikehaldet
- Behov for å vurdere tekniske spesifikasjonar i lys av faktiske miljølastar

Hovudtilrådinga frå aktiviteten Miljøbelastningar i vegtunnelar er at Statens vegvesen startar opp ein diskusjon og avklarar korleis vi tar fatt i problemstillinga. Kartlegging av miljølastar i den enkelte tunnel må ha som mål å komme til konkret nytte ved val av konstruksjonslysingar, slik at dei blir tilpassa miljøet på kvar enkelt stad.

*Innhenting av erfaringsdata bør først og fremst vere koplta mot rehabiliteringsprosjekta fordi det er her vi stadig kan hente inn nye bestandighetsdata. Vegen fram til implementering blir på den måten også kortast muleg. Samstundes er det nødvendig å skaffe seg betre oversikt over miljølastene i tunnelprosjekt som er på planleggingsstadiet.*

Ein bør legge vekt på følgjande klassifisering:

- Eksponeringsklassane i NS-EN 206 (Betongstandard)
- Korrosivitetsklassene i NS-EN ISO 12944-2 (sjå bl.a. Knudsen 2016)
- Statens vegvesens «Inspeksjon av berg og bergsikring i vegtunnelar» (Lindstrøm mfl. 2013)
- Bergmasseklassifisering ved Q-systemet
- Hydrogeologiske forhold

Med dette som utgangspunkt vil det vere muleg å seksjonere tunneltraséane alt på planleggingsstadiet, slik at variasjonane mht. miljølastar kjem fram. Dersom dette settast i system i samband med nye prosjekt vil det kunne danne eit heilt nytt grunnlag for planlegging og budsjettering for seinare drift og vedlikehald.

### **Takkens ord**

Takk til Carl Lewin (Cacon) for tekstbidrag og opplysningar til kapittel 2.4, samt Alf T. Kveen og Synnøve A. Myren (SVV) for all hjelp med å sjå alle aktivitetane innan Varige konstruksjonar - Tilstandsutvikling tunnel i samanheng.

## 5 Referansar

- Andersen S, Snilsberg P, Amundsen CE, Dreyer Olsen R (1995): Miljøkjemisk undersøkelse av tunnelvasking. Jordforsk. Rapport 31/95 Juni 1995.
- Bastiansen R, Moum J and Rosenqvist I Th (1957): Bidrag til belysning av visse byggetekniske problemer ved Oslo-området alunskifere. Norges geotekniske institutt. Publikasjon nr 20, 69 sider.
- Bye TI & Kynningsrud HR (2015): Rapport Varige konstruksjoner, F108 Hvalertunnelen. Statens vegvesen, 80 sider.
- Buvik H, Gjæringen G, Solbjørg S, Hagelia P, Holberg A (2006): Vegkapital – Tunnel. Optimal drift- og vedlikeholdsinnsetning. Statens vegvesen.
- Davik KI (1997): Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler. Sluttrapport. Statens vegvesen, 46 sider.
- Dickson, WH, Caccavo, F, Olesen, B, Lewandowski, Z (1997): Ennoblement of stainless steel by manganese-depositing *Leptothrix discophora*. Applied and Environmental Microbiology 63-7, 2502-2506
- Drangsholt F (2001): Måling av virkningsgrad på støvrenseanlegget i Lærdalstunnelen. Høgskolen i Stavanger, Teknisk rapport, 2001-09-19
- Fjose A (2015): Nedbryting av sprøytebetong i E39 Hopstunnelen og Nesttuntunnelen. Masteroppgåve NTNU Trondheim, 244 sider.
- Graarud, E og Nilsen B (1987): Undersjøiske tunneler, delprosjekt 1 – forundersøkelser og driving. Delrapport 1.1 – Vardøtunnelen. SINTEF-rapport STF36 F87021
- Gulland J (2015): Sprøytebetong testet med destruktiv og ikke-destruktiv metode. Masteroppgåve NTNU Trondheim, 138 sider
- Hagelia, P (2007): Sprayed concrete deterioration influenced by saline ground water and Mn-Fe biomineralisation in subsea tunnels. Mechanical Effects on Reactive Systems. The 20th Kongsberg Seminar, Physics of Geological Processes (PGP), University of Oslo, side 26.
- Hagelia, P. (2011): Deterioration Mechanisms and Durability of Sprayed Concrete for Rock Support in Tunnels. PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, Nederland. 205 sider & Appendiks
- Hagelia, P. (2013): Interaction of Interaction of abiotic and biochemical reactions and their role in concrete deterioration. Concrete July/August 2013, pp 49-51.
- Hagelia, P. (2015): Spalling of sprayed perlite concrete caused by popcorn calcite deposition and internally derived sodium sulfate under influence of water leakage, frost action and dynamic loads. 15th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials. Delft, The Netherlands, pp 387-400.



- Hagelia, P. (2016a): Oppsummering av tilstandsutvikling i sprøytebetong som bergsikring i ulike tunnelmiljø. Statens vegvesen rapport nr 566
- Hagelia, P. (2016b): Oslofjord testfelt for sprøytebetong – etablering og fem års testresultat. Statens vegvesen rapport nr. 570
- Hagelia, P. (2016c): Internt sulfatangrep i lettbetong med perlitt – Nestunnelen E16. Statens vegvesen rapport nr 582
- Hansen BO (1996): Levetidsbetraktninger av sprøytebetong i undersjøiske tunneler (Flekkerøy). Rapport frå temadag i Ålesund 12–14 august 1996, tema 3.3.
- Hedalen T (1995): Arbeidsmiljø i vegtunneler satt under trafikk. Delrapport 1: Kartlegging av kjemiske, fysiske og biologiske arbeidsmiljøfaktorer. SINTEF Bergteknikk, Rapport STF36 A95001, 86 sider.
- Hem LJ, Bruas L, Vik EA (2003): Naturlige tetteprosesser – Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. Statens vegvesen, Intern rapport nr. 2306
- Hofseth, M. (2014): Gode løsninger for vegtunneler. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012–2015. Statens vegvesen rapport nr.334
- Holm, J.V. (2011): E16 Nestunnelen – nedfall av sprøytebetong. Norconsult – Notat nr.1, Oppdragsnr. 5111160.
- Karačić S, Hagelia P, Persson F and Wilén B–M (2016): Microbial Attack on Subsea Sprayed Concrete. Manuskript til RILEM–MCI seminar. TU–Delft Juni 2016, 13 sider
- Klemetsrud, K (2016): Korrosjonsforsøk på bolter i Vardøtunnelen, Statens vegvesen rapport nr. 464.
- Klemetsrud, K (2016): Korrosjonsforsøk på bolter i Oslofjordtunnelen, Statens vegvesen rapport nr. 466.
- Klemetsrud, K og Helgestad, S (2016): Prøving av tidligfasthet for boltemørtel, Statens vegvesen rapport nr. 510.
- Knudsen O.Ø. (2016): Korrosjonsbeskyttelse i tunneler – revidert. Statens vegvesen rapport nr. 410, 37 sider.
- Lewin, C (2014): Materialteknisk sluttrapport – Karmøy tunnelen Fv 47, T–forbindelsen, 44 sider.
- Lewin, C (2015): Bolter fra Bømlafjordtunnelen, billedsamling #1. CaCon– Notat 10.04.2015.
- Lindstrøm M og Kveen A (2004): Miljø- og samfunnstjenlige tunneler – Sluttrapport. Statens vegvesen, Publikasjon nr 105, 72 sider
- Lindstrøm M, Magnussen AW og Langelid A (2013): Inspeksjon av berg og bergsikring i vegtunneler. Statens vegvesen rapport 199.

- Luke J (2012): Kartlegging av miljøbetingelser i tunneler. Helltunnelen, Ekebergtunnelen og Smestadtunnelen. Forprosjekt til Varige konstruksjoner. Nordconsult, Oppdragsnr. 5113881.
- Myran T (1985): Partikkelforurensning i vegtunneler. SINTEF rapport STF36 A85100, 27 sider.
- Rønneberg, C. og Østmoen T.A. (Aas-Jakobsen AS) (2016): Tilstand og tilstandsutvikling av ulike typer vann- og frostsikringshvelv. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012–2015. Statens vegvesen rapport nr. 470.
- Sandberg & al: Undersökning av tunnelmiljöns korrosiva egenskaper – Etapp 2. Korrosjonsinstituttet 2001–05–07
- Statens vegvesen (2012): Etatsprogrammet Moderne vegtunneler 2008–2011, <http://www.vegvesen.no/fag/Fokusomrader/Forskning+og+utvikling/Avsluttede+FoU-program/Moderne+vegtunneler/Rapporter>
- Statens vegvesen og Mannvit AS (2016): Tilstandskontroll sprøytebetong. Samlerapport fra tunnelene Frøya, Sløverfjorden, Grua, Svartdal/Ekeberg, Baneheia og Flekkerøy. Statens vegvesen rapport nr. 475.
- Statens vegvesen (2016): FoU-programmet Varige konstruksjoner 2012–2016. Sluttrapport. Statens vegvesen rapport nr 606.
- Statens vegvesen (2016b): Etatsprogrammet NORWAT 2012–2015, [www.vegvesen.no/norwat](http://www.vegvesen.no/norwat)
- Sørli J og Tønnesen DA (1990): Ekebergtunnelen – Vurdering av luftforurensninger. NILU OR 7/90 – O-1419, januar 1990. 27 sider.

*Vedlegg 1 Doktorgradsprogram ved Chalmers – Gøteborg innan E39 prosjektet (2015–2020):*

- *The role of microbiological biofilm communities for degradation of sprayed concrete in subsea tunnels*

*Vedlegg 2 Miljøanalysar frå aktiviteten Tekniske installasjonar i Varige konstruksjonar – Tilstandsutvikling tunnel (bidrag frå Carl Lewin):*

- *Eksempel på bioakkumulasjon i Karmøytunnelen*
- *Eksempel på slamanalysar – Rennfasttunnelane*



# CHALMERS

**Final report of the preliminary study of the project**  
**”The role of microbiological biofilm communities for degradation of  
sprayed concrete in subsea tunnels”**

2014

Britt-Marie Wilén & Frank Persson, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Water Environment Technology (WET), Per Hagelia, Norwegian Public Road Administration (NPRA)

# **Final report of the preliminary study of the project**

## **”The role of microbiological biofilm communities for degradation of sprayed concrete in subsea tunnels”**

Britt-Marie Wilén & Frank Persson, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Water Environment Technology (WET), Per Hagelia, Norwegian Public Road Administration (NPRA)

### **Background**

There are today over 30 subsea tunnels in Norway. These tunnels, built since the early 1980's, connect islands and peninsulas in the fjord dominated landscape. Several new subsea tunnels are also planned in the near future, within the ferry-free coastal route E39 project.

Sprayed concrete is used for rock support in road tunnels. To increase the elastic properties, the sprayed concrete is reinforced with fibers, commonly made of steel. Degradation of the sprayed concrete and its fibers due to chemical and microbial reactions can result in destabilization of the rock mass, leading to potential safety risks, increased costs for maintenance and reduced overall lifetime of the tunnel. In general the sprayed concrete is designed to last for more than 50 years but in many cases deterioration can be observed after less than 5 years.

A novel deterioration process has recently been discovered in several Norwegian subsea tunnels resulting in rapid degradation of the concrete matrix and destructive corrosion of the steel fibers in areas with leakages of saline groundwater. Thick microbial biofilms, with (putative) iron- and manganese oxidizing bacteria are involved in the degradation process. Investigation regarding effects on concrete in the Oslofjord tunnel and three other Norwegian subsea tunnels suggests the structural impact of biofilms on sprayed concrete varies a lot. As yet knowledge about the microbial communities involved is extremely poor. In order to understand and ultimately prevent such degradation processes, thorough biofilm microbiological and chemical studies are necessary. Microbial biofilm communities and their activities involved in degradation (corrosion) of manmade materials are however complex and require detailed investigations using molecular microbial methods in conjunction with thorough chemical measurements in order to avoid oversimplifications

The significance of sprayed concrete degradation caused by Mn and Fe bacteria in subsea road tunnels in Norway has been reported previously in a PhD thesis by Hagelia in 2011 and papers by Per Hagelia written during the period 2007-2013. Although the phenomena, typical deterioration reactions and characteristic environmental loads are now quite well established, the problem cannot be solved without a much closer look at the microbial communities involved. There is, hence, a need for involving microbiological expertise. This report summarizes the activities of the pre-study for the project 10 “The role of microbiological biofilm communities for degradation of sprayed concrete in subsea tunnels”.

## **Activities**

When the Norwegian Public Road Administration (NPRA) first initiated contacts with Chalmers for collaboration within the E39 project, the problem of degradation of reinforced sprayed concrete was mentioned as one critical problem that should be studied within the frame of a PhD project. To collect information and establish contacts between Chalmers and NPRA a series of activities were initiated.

### **Subsea Tunnel workshop at Chalmers 2014 02 24**

Frank Persson took part in the workshop, presented the research problem and ideas for a research proposal and got feedback on the proposed approaches for the planned PhD project.

### **Meeting in Oslo 2014 03 04**

#### Visit to NPRA head office in Oslo

Per Hagelia, Thomas Haverkamp, Mohammed Hoseini, Alf T. Kveen, Britt-Marie Wilén and Frank Persson met as NPRA for a full day of discussions of the problem with degradation of reinforced sprayed concrete. The meeting was intended as a start-up of the process of planning a PhD project.

The research and development projects at NPRA were briefly summarized by Per Hagelia and Alf T. Kveen to give everyone an overview of their activities. Per Hagelia gave in-depth background of the problem of microbially induced corrosion (MIC) and degradation of sprayed concrete, based on his research.

Thomas Haverkamp, dept. of Biosciences at the University of Oslo, summarized a preliminary study of the microbial communities in the sprayed concrete biofilms, with emphasis on details about the methods for analysis such as primer choice, DNA extraction methodology, metagenomics experiences etc. We have now access to the results of this preliminary study as background for setting up the experiments for the proposed PhD project.

Frank Persson and Britt-Marie Wilén presented their ideas so far about approaches for investigations, as well as introduced the competence and infrastructure within the group at Chalmers, including the collaborations with GU. A discussion followed about approaches for investigating MIC in sprayed concrete. Mohammed Hoseini also advised on how to formulate a PhD project within the Chalmers-NPRA collaboration.

#### Discussion of content of the project

After the meeting, Per H, Britt-Marie and Frank started to work on the PhD plan and set out a framework for the project including; criteria for choice of study sites, experimental set-ups, time plans, organization and supervision (Per H, FP and BMW will all be supervisors), external collaborations and the need for additional infrastructure (access to lab facilities in Oslo during sampling campaigns).

#### On-site visit in the Oslofjord test site

The Oslo meeting was planned to match the regular maintenance work in the Oslofjord tunnel, to get access to the test site (only accessible during tunnel maintenance). Per, Britt-Marie and Frank visited the test site between 10 pm and 2 am for sampling within the ongoing program at NPRA and for testing sampling methods for microbial community analysis, with regard to the different types of microbial biofilms present at different corrosion spots in the tunnel. Samples were also brought to Chalmers, where sample preservation methods were tested.



**Figure 1. Photos from left to right: the tunnel at the test site, one of the tunnel locations with extensive biofilm formation and close up of the biofilm on the sprayed concrete.**

### **Participation in Teknologidagene-Program for E39**

Britt-Marie and Per H participated in the conference “Teknologidagene” arranged by NPRA in the programme specially devoted to the E39 project (8-9 October 2014). The research proposal was presented by Britt-Marie.

### **Establishment of collaborators**

Since this project involves different disciplines such as geochemistry, geology, ground water chemistry, microbiology, molecular biology and concrete, some contacts were taken to discuss the project and to initiate collaboration. The following contacts have been taken during 2013-2014:

Adj. Prof. Karsten Pedersen, CEE, GeoEngineering, Chalmers. Karsten has vast experience of geomicrobiology including methodology such as microsensors for chemical gradient measurements, which will be used within the project.

Prof. Karin Lundgren, CEE, Structural Engineering, Chalmers. Karin is leading the research group Concrete Structures at Chalmers, with projects about e.g. corrosion of reinforcement, with relevance for the proposed PhD project.

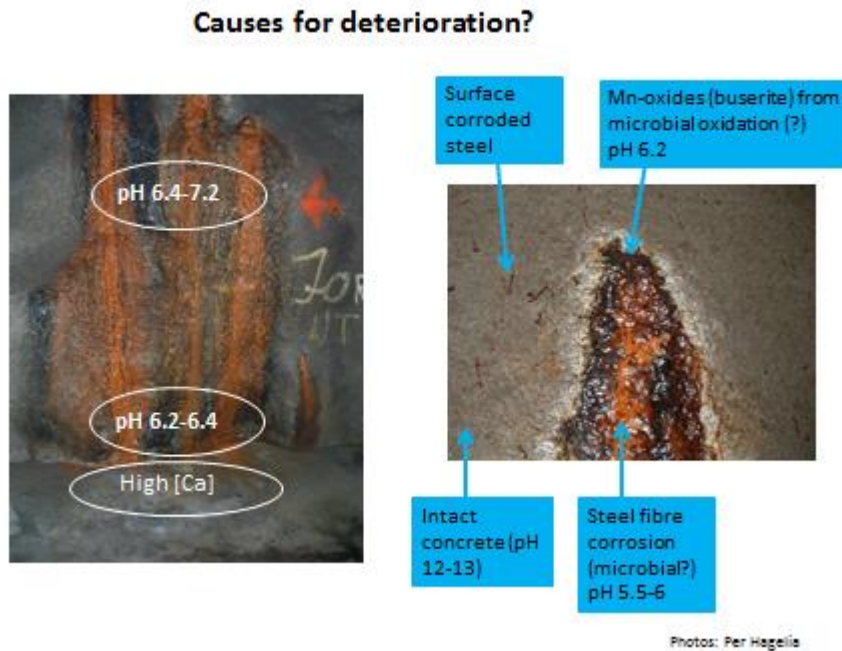
Prof. Malte Hermansson, CMB, Microbiology, University of Gothenburg is an expert in biofilm microbial ecology, including MIC. We also have access to the laboratory facilities at CMB, Microbiology for the proposed PhD project.

Also international collaboration, within the Mn and Fe microbiological /biomineral system is being established.

### **Research approach**

There are already some hypotheses for the causes of the degradation of the concrete based on literature and previous research by Per Hagelia (Figure 2) as well as in the available literature (Appendix 1). In this research plan, we propose studies of spatial and temporal patterns, using a suite of molecular microbial

methods and chemical measurements, for assessment of the composition, diversity, stratification and activity of the biofilm communities in relation to the associated degradation of concrete and fibers. Studies will be performed on site in the subsea tunnels as well as at defined conditions at laboratories (Figure 3). To be able to understand how the biofilm works it is important to measure the gradients of important parameters such as pH, H<sub>2</sub>S and O<sub>2</sub> concentrations, and oxidation-reduction potentials with microelectrodes (Figure 4). These measurements will mainly take place on site but also in small controlled systems in the lab where pieces of biofilm from the tunnel(s) are exposed to different environmental conditions, such as ground water chemistry, O<sub>2</sub> concentration etc, mimicking the conditions in tunnel.



**Figure 2. Possible causes for the deterioration of reinforced sprayed concrete.**



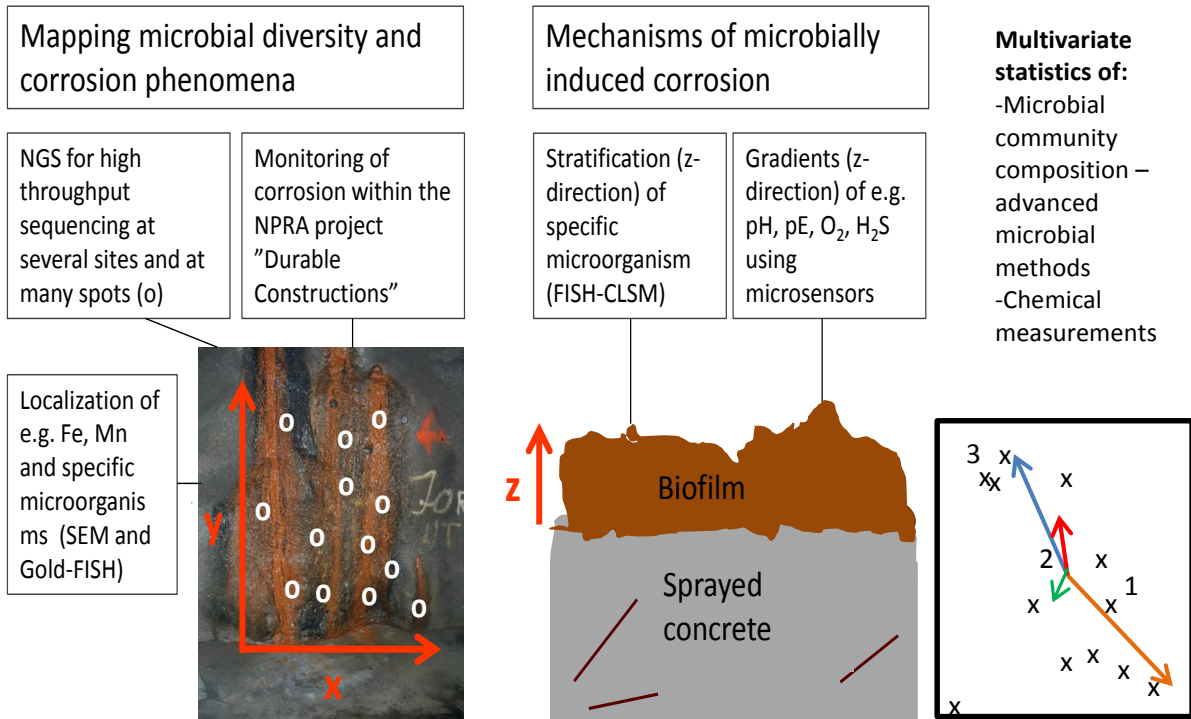


Figure 3. Experimental approach

### What role does the biofilm have?

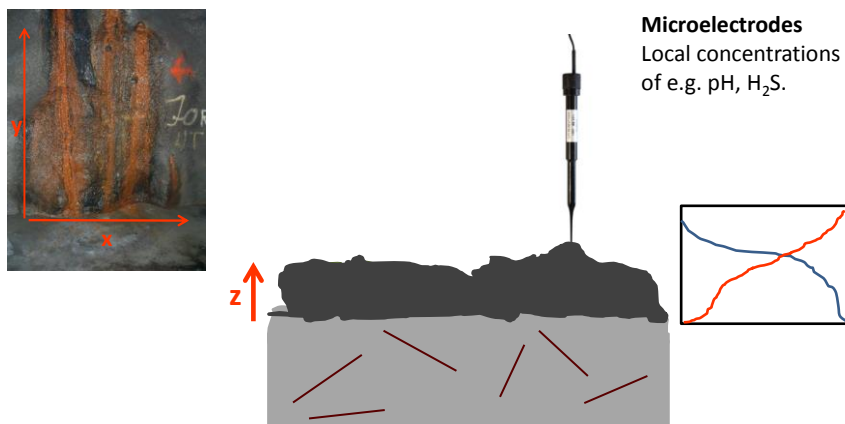


Figure 4. Measurement of gradients of environmental conditions inside the biofilm by microelectrodes.

## **Writing a PhD plan**

Based on the meetings, feedback and on-site visit we started to write a PhD project plan which was finished in time for the steering group meeting within the NPRA-Chalmers collaboration, August 2014. The PhD proposal is attached in Appendix 1.

We have already made a study plan with some suggested PhD courses included (Appendix 3).

## **Advertisement for a PhD position**

The advertisement for a PhD student was done mid December 2014 with deadline the 11<sup>th</sup> of January 2015 (Appendix 2). In total 24 applicants were registered and we are now in the process of selecting candidates for an interview. By the 20<sup>th</sup> of January all applications had been read and Frank and Britt-Marie had a selection meeting the 22<sup>nd</sup> of January and after that we have discussed with Per Hagelia who will be eventually called for an interview. This process is ongoing and we will start invite candidates for interviews at the end of January. The plan is to start the project in the beginning of April. The person we look for should have some knowledge in microbiology, building materials and/or some other insight into infrastructure. It would also be desirable with some knowledge in concrete chemistry. However, we realize that it is very hard to find such person so the most important is the interest in the topic and he or she has to study the areas where lack of knowledge exists.

## **Planned Purchase of equipment**

Since it is important to be able to measure on site own equipment for this must be purchased. We plan to buy equipment for measurement of profiles within the biofilm with microelectrodes from Unisense ([www.unisense.com](http://www.unisense.com)) in Denmark. We have experience in using this type of equipment and Unisense are leading on the market. We need to buy a control panel (measurement instrument) with computer, a micromanipulator that enables fine tuning of the movement of the electrode ( $\mu\text{m}$  scale) and a stereomicroscope which enables exact position of the electrodes at the upper part of the biofilm as well as electrodes. Altogether this equipment cost approximately 250 000 – 300 000 Nkr. Since we have not used all money available for the pre-study (ca 200 000 Nkr) we would like to use the remaining part for the purchase of this equipment.

## **Concluding remarks**

The project will start spring 2015 after a substantial literature review, site visit and discussions. As a start a PhD student will be selected and the microsensor equipment will be purchased. During 2015 sampling of the test sites will start and a methodology for sampling and preservation of the biofilm samples will be developed. The molecular techniques have been developed at WET where the same methods are applied for studies of mainly wastewater biofilm, flocs and granular sludge. The PhD candidate will start relatively soon to learn these techniques.

## References

Hagelia, P., *Deterioration mechanisms and durability of sprayed concrete for rock support in tunnels*. 2011, TU-Delft, The Netherlands. 205 pp. + appendices. <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Ad64b8ff8-8d68-4eea-a320-73148e9f1b15/>

## **APPENDIX 1.**

# **THE ROLE OF MICROBIOLOGICAL BIOFILM COMMUNITIES FOR DEGRADATION OF SPRAYED CONCRETE IN SUBSEA TUNNELS**

## **SUMMARY**

There are today over 30 subsea tunnels in Norway. These tunnels, built since the early 1980's, connect islands and peninsulas in the fjord dominated landscape. Several new subsea tunnels are also planned in the near future, including within the ferry-free coastal route E39 project.

Sprayed concrete is used for rock support in road tunnels. To increase the elastic properties, the sprayed concrete is reinforced with fibers, commonly made of steel. Degradation of the sprayed concrete and its fibers due to chemical and microbial reactions can result in destabilization of the rock mass, leading potential safety risks, increased costs for maintenance and reduced overall lifetime of the tunnel. In general the sprayed concrete is designed to last for more than 50 years but in many cases deterioration can be observed after less than 5 years.

A novel deterioration process has recently been discovered in several Norwegian subsea tunnels resulting in rapid degradation of the concrete matrix and destructive corrosion of the steel fibers in areas with leakages of saline groundwater. Thick microbial biofilms, with (putative) iron- and manganese oxidizing bacteria are involved in the degradation process. Investigation regarding effects on concrete in the Oslofjord tunnel and three other Norwegian subsea tunnels suggests the structural impact of biofilms on sprayed concrete varies a lot. As yet knowledge about the microbial communities involved is extremely poor. In order to understand and ultimately prevent such degradation processes, thorough biofilm microbiological and chemical studies are necessary. Microbial biofilm communities and their activities involved in degradation (corrosion) of manmade materials are however complex and require detailed investigations using molecular microbial methods in conjunction with thorough chemical measurements in order to avoid oversimplifications. In this research plan, we propose studies of spatial and temporal patterns, using a suite of molecular microbial methods and chemical measurements, for assessment of the composition, diversity, stratification and activity of the biofilm communities in relation to the associated degradation of concrete and fibers. Studies will be performed on site in the subsea tunnels as well as at defined conditions at laboratories.

## **SPECIFIC AIM AND OBJECTIVES**

The overall aim of this project is to increase the understanding of the mechanisms involved in the biologically mediated corrosion of sprayed reinforced concrete in subsea tunnels. More specifically the objectives are to (1) investigate the biofilm composition in terms of microbial and chemical composition; (2) investigate the environmental conditions within the formed biofilms (e.g. pH, redox-potential, dissolved oxygen concentration and concentrations of sulfur species, nitrogen species etc.); (3) understand the biofilm evolution in terms of both time and space; (4) understand how different types of biofilms are formed depending on the prevailing environmental conditions at a particular site; (5) understand how the biofilm interacts with the under-laying sprayed concrete and eventually deteriorates it; (6) come up with possible solutions to prevent biofilm formation.

## **BACKGROUND (OVERVIEW OF THE RESEARCH AREA)**

Sprayed concrete reinforced with steel or synthetic fibre for rock support in subsea tunnels in Norway has been observed to deteriorate quickly with notable disintegration and corrosion of steel fibre within less than 5 years. Different mechanisms affect the cement paste matrix, which is mainly made up by calcium silicate hydrate (C-S-H). The degradation can be due to physical, chemical and biologically mediated mechanisms. This may destabilize the rock mass underneath and lead to increased maintenance costs but also risks. Sprayed concrete is exposed to different environmental loads such as water containing high  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , and  $\text{HCO}_3^-$  concentrations leading to both abiotic and biochemical reactions. The Mn-Fe biofilms have commonly caused acidification and weakening including material loss from sprayed concrete surfaces. This is due to extensive decalcification, with associated formation of thaumasite, calcite and brucite further inside. Formation of Mn-biominerals (buserite and todorokite) and Fe-compounds (ferrihydrite e.t.c.) play an important role in the chemical cycle. Calcium also leach from the concrete, forming calcite stalactites, as well as precipitations in the form of brucite, aragonite and gypsum which leads to further deterioration of the surface [1, 2]. Since concrete has a very porous structure with high surface roughness, access to water containing organic material together with an appropriate chemical composition can make microorganisms grow and colonise its surface, forming layers of biofilm.

Microbiologically induced concrete corrosion (MICC) is a well-known phenomenon that has been observed for a long time in for instance sewer systems [3]. Bacterial activities produce acidic compounds such as carbon dioxide and hydrogen sulphide which will reduce pH locally at the concrete surface. These conditions are favourable for sulphate oxidising bacteria (SOB) which oxidize hydrogen sulphide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) to sulphuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). These SOB are typically *Thiobacillus*. However, as pH drops there is a succession in SOB to species that can withstand low pH such as *Acidothiobacillus* [3]. Eventually the concrete loosens up, a process that can take 2-15 years. At this stage gypsum is formed (expansive gel) when  $\text{H}_2\text{SO}_4$  reacts with  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  which leads to cracks in the concrete structure [4].

The steel fibres in concrete start to corrode very fast, especially when exposed to saline environments [5]. Chloride increases the solubility of  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  which protects the steel surface from corrosion [6]. This leads locally to fast decrease in concrete strength. Abiotic corrosion of mild steel will occur when exposed to oxygen forming iron oxides [7]. Biofilm formation can lead to the formation of an anode underneath with little oxygen and a cathode in the aerated surfaces which will accelerate the corrosion even further. If the conditions are anaerobic, protons or hydrogen sulphide is reduced forming molecular hydrogen that can be used by sulphur reducing bacteria (SRB) as electron donor. Iron sulphide can be formed by SRB which will lead to further acidification. Reduced sulphide and ferrous iron are further oxidized with oxygen as terminal electron acceptor forming ferric oxide/hydroxides (rust) and elemental sulphur [7]. Due to concentration gradients of oxygen and pH in biofilms found in sewer pipes, SOB and SRB co-exist [8]. Stainless steel can also corrode due to alteration of the protective passive oxide layer made up of manganese oxides. It has been demonstrated that the manganese oxidizing bacteria (MOB) *Leptothrix discophora* can cause corrosion of stainless steel surfaces [9].  $\text{Mn}^{2+}$  is oxidised to  $\text{MnO}_2$  via  $\text{MnOOH}$ . It is hypothesised that  $\text{MnO}_2$  act as a cathode and is reduced to  $\text{Mn}^{2+}$  via  $\text{MnOOH}$ , which is recycled by MOB to  $\text{MnO}_2$ . In the Norwegian study a similar reaction was proposed to be responsible for the manganese oxidation. Bacteria with morphologies similar to *Leptothrix discophora* were observed. The  $\text{Fe}^{2+}$  was believed to be produced by *Gallionella ferruginea* (*betaproteobacteria*) and/or *Mariprofundus ferrooxidans* (*Zetaproteobacteria*)

[1, 2]. The identification was, however, made on morphology only. It was also observed that iron and manganese accumulated on tunnel surfaces soon after concrete spraying. Iron oxidising bacteria (FeOB) are regulated to narrow redox boundary areas where there is Fe<sup>2+</sup> rich water at moderate levels of oxygen [10]. Chemical iron oxidation outcompetes the biological process at higher oxygen concentrations [11]. The understanding of the role played by FeOB in steel corrosion is incomplete [12]. FeOB within the *zeta-proteobacteria* have been found on carbon steel coupons in coastal seawater where the microbial communities were examined by clone libraries [12, 13].

The interactions between abiotic and microbial processes associated with concrete deterioration are complex and needs to be studied in situ conditions and modern molecular techniques have to be applied since most bacteria are not cultivable.

The Norwegian Public Road Administration (NPRA) established in 2010 a test site in the Oslofjord subsea tunnel at a location where severe deteriorations caused by microbial biofilm formation was observed on a 10-year old steel fibre reinforced sprayed concrete. At the location three sprayed concrete mixtures, including steel fibres and synthetic fibres, were sprayed manually on the tunnel wall. Additionally cast concrete samples of the same three concrete mixtures were made and exposed permanently in local ditch waters (ditch A and B) and air. The test site will be in operation at least beyond 2020. Ditch A receives tunnel drain water from a larger part of the tunnel. The ditch is fed by a steady source of representative water. Ditch B is provided with stagnant water from the period when spraying took place [5].

An additional test site will be investigated in parallel as the conditions are slightly different: the Frøya tunnel in Trondheim. Two locations will be investigated where intrusion of saline groundwater has occurred. At these sites biofilm formation has been observed locally with significant deterioration of the sprayed concrete. This tunnel was opened in 2000. Compared to the Oslofjord test site, the effect of the biofilm on cement paste degradation appear to be less and therefore it is of interest to elucidate the reasons behind this.

## **PROPOSED RESEARCH (RESEARCH DESCRIPTION)**

Degradation (corrosion) of manmade materials is often a combination of intricate biotic and abiotic reactions. Biodegrading and -corroding microbial communities are usually complex consortia with intricate interactions with their abiotic environment [14]. Most of the past investigations of microbiologically induced corrosions (MIC) has relied on cultivation to get bacterial isolates and has resulted in simplified models to reduce the complexity inherent in multi-species biocorroding biofilms [13]. Only a small fraction of environmental microorganisms are cultivable [15]. Hence, extrapolation of cultivation-based results to the real world has often failed to produce effective strategies for corrosion control [13]. In this research proposal, identification, diversity, localization and successional patterns will consequently be investigated with an array of molecular methods on-site in the subsea tunnel to prevent such oversimplifications. In parallel, controlled experiments will be performed in the laboratory where biofilm harvested from the test sites will be exposed to water with chemical compositions similar to the ones on-site to assess detailed degradation processes as well as biofilm development.



**Figure 1.** Photos from left to right: the tunnel at the test site, one of the tunnel locations with extensive biofilm formation and close up of the biofilm on the sprayed concrete.

### **PHASE I. COMPOSITION AND DIVERSITY OF BIOFILM CONSORTIA ON REINFORCED SPRAYED CONCRETE**

*The composition of the biofilm microorganisms will be investigated using next generation sequencing (NGS) at different areas on the sprayed concrete surfaces from the Oslofjord tunnel and the Frøya tunnel sites. Resulting compositional patterns will be compared with data on local environmental (corrosion related) factors, such as pH, redox potential and accumulation of corrosion products using obtained within the NPRA sampling program in the project Durable Constructions. The potential outcome of this survey is (I) determination of the microorganisms present (II) understanding of the compositional changes at different locations (III) a map relating compositional changes with corrosion related environmental factors and (IV) it will provide basis for how to select parameters for the successional study at lab conditions (phase III).*

Complex microbiological communities have been revealed by molecular methods in biofilms related to microbiologically induced concrete corrosion (MICC) in sewers [3, 16] and on corroding metal surfaces [13, 17]. With the recent advents of NGS and metagenome analyses, complexity has further increased and potentially new players have been identified [18, 19].

Investigations of the composition of microorganisms on the sprayed concrete will be performed by NGS using the MiSeq Illumina platform. This enables in-depth amplicon sequencing of specific regions of the 16S rRNA gene of many (>96) parallel samples for rigid multivariate statistical analysis of composition and diversity [20]. An initial study of the biofilm community at the Oslofjord tunnel test site has recently been performed and the results of this study will be used for choice of methods and approaches for DNA extraction and –amplification [21]. For thorough phylogenetic characterization of major taxa present, clone libraries will be constructed for near full-length sequencing (Sanger) of the 16S rRNA gene, as well as of functional genes. This approach also provides us with the genomic information necessary for probe- and primer selection and construction used in phase II and III below.

Samples will be taken at different spots (in the x-y dimension) at the subsea tunnel sites. For identification of the relations between corrosion related (and other) environmental factors and the microbial community compositions, multivariate analysis will be performed using e.g. canonical correlation analysis and redundancy analysis [22], which has proven useful for this type of comparisons [23].

## **PHASE II. LOCALIZATION AND STRATIFICATION OF MICROORGANISMS INVOLVED IN DETERIORATION OF SPRAYED CONCRETE**

*In this part of the research, we will investigate the spatial distribution of the important corrosion related microorganisms (identified in phase I) in depth within the biofilms in relation to the micro-scale environmental conditions at biofilms from the different subsea tunnel sites. In biofilms, specific spatial localization and stratification of functional microbial groups is a common phenomenon. Often this is related to variations in pH, oxygen concentrations, availability of substrates etc., with depth in the biofilm, caused by the activities of the microorganisms and their surrounding environment. Furthermore, spatial separation of electron donors (anodes) and ultimate electron acceptors (cathodes) is pivotal for MIC and often occur with depth in the biofilms. Potential outcomes of the studies include (I) a linkage between the identified microorganisms and their activities at different depth in the biofilm (II) direct comparison of the microbial and chemical stratification in the biofilms from different sites with different corrosion characteristics.*

The localization of microorganisms is fundamental for corrosion phenomenon. Recent studies have e.g. shown distinct localization patterns of microbial organisms responsible for concrete sewer corrosion in depth (z-direction) within biofilms [8] as well as at different areas of the concrete surface (x-y direction) [19].

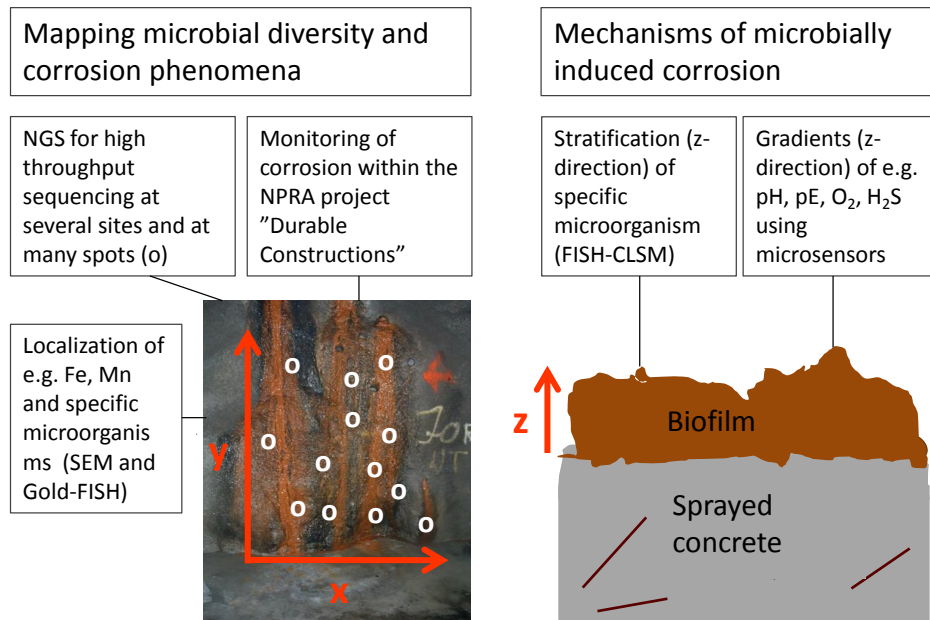
For quantification of specific microorganisms at different sites on the concrete surfaces (x-y direction) we will use quantitative PCR (qPCR) for 16S rRNA genes and for functional genes. qPCR allows high throughput quantification of target genes in environmental sample and has proven robust for quantification of changes in microbial consortia across temporal and spatial scales [24].

The spatial organization and stratification of microorganisms in biofilms (z-direction) will be investigated by fluorescence in situ hybridization (FISH) together with confocal laser scanning microscopy (CLSM) [25]. For retrieval of intact biofilms we will use cryoembedding and cryosectioning [26]. Acquired CLSM images will be analyzed by statistical image analysis methods to show distribution- and co-localization patterns of the biofilm microorganisms [27].

The gradients within the biofilm of concrete deterioration and corrosion relevant parameters such as oxygen, pH, H<sub>2</sub>S and redox will be investigated by microelectrodes. The use of microelectrodes in corrosion studies has e.g. shown the local sites of microbial activity in biofilms and corroded materials (in z-direction) and can also be used to calculate the flux of metabolic products, e.g. H<sub>2</sub>S, from the biofilm to the surrounding environment [8]. The combination of microelectrode measurements and FISH furthermore provide a link between the identity and localization of specific microorganisms and their function [3].

Further linkage between identity and activity of microbial community members can be provided by the novel method of combining FISH with scanning electron microscopy (SEM), called Gold-FISH [28]. By having the oligonucleotide probes conjugated to gold nanoparticles, simultaneous localization of FISH targeted populations and deposits of e.g. iron and manganese would be possible by SEM using EDS-mapping and would provide a novel way of linking identity and localization of target microorganisms with their surrounding abiotic environment, including potential electron donors and acceptors.





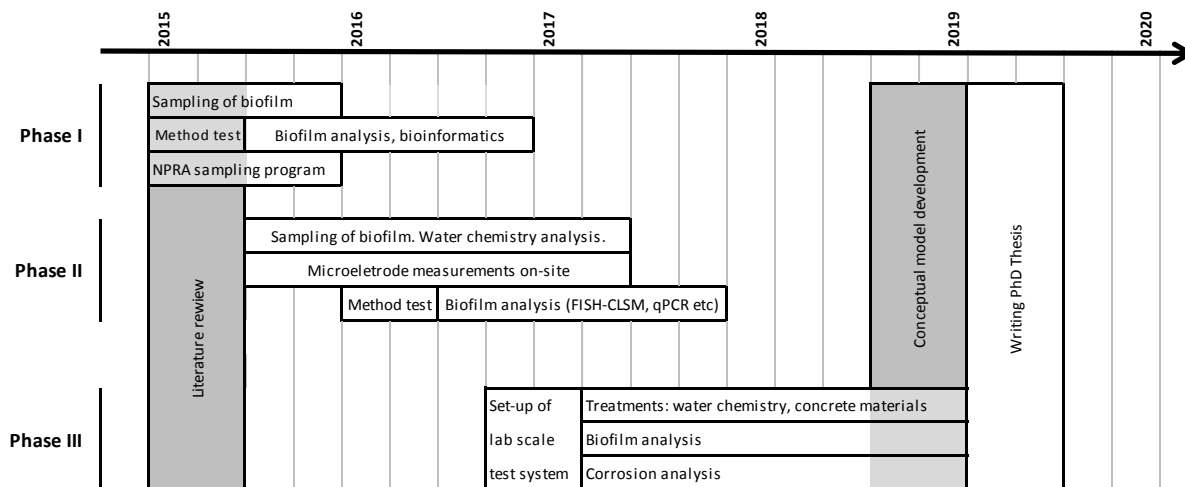
**Figure 2.** Example of approaches used in the proposed research. Photo to the left of biofilms at the Oslofjord tunnel test site (Per Hagelia). Schematic image to the right of biofilm on top of the reinforced sprayed concrete.

### PHASE III. SUCCESSIONAL PATTERNS OF CONCRETE DEGRADING MICROBIAL COMMUNITIES

*In order to understand the formation and mechanism of degradation of sprayed reinforced concrete, temporal studies will be performed on pristine surfaces at defined conditions at the lab at Chalmers. Different treatments include water chemistry data (salinity, redox etc.), obtained by the measurements at the different tunnel sites, as well as different concrete reinforcement materials (steel and polypropylene fibers). Here the composition, localization and stratification of the biofilm microorganisms in relation to the degrading activities will be followed in time-series. One important potential outcome is the establishment of critical factors (abiotic and/or microbial) for the development of degradation of reinforced sprayed concrete.*

The methods and approaches outlined in Phase I and II will be used in the study of temporal patterns of microbial communities and degradation of concrete and fibers.

Ultimately the body of information and evidence acquired in phase I-III will be used for development of a conceptual model, which takes the spatial and temporal patterns of biofilm compositions and corrosion on different materials into account.



**Figure 3.** Overview of the activities within the research project.

## COURSES

A PhD student should take a number of courses of 120 credits during their training. Courses include more general competence development to become a researcher such as information literacy, career planning, scientific writing and pedagogy as well as specific competence development. For this project, several in-depth courses in e.g. microbial methods, biotechnology, bioinformatics, and geochemistry will be part of the training program.

## ORGANIZATION

The research will be conducted by a PhD student at Water Environment Technology (WET), dept. of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, together with supervisors and other collaborators.

### Supervisors

Prof. Britt-Marie Wilén (WET) is leading the group within the field of wastewater treatment at WET. Britt-Marie has vast experience in environmental biotechnology with special expertise in wastewater processes.

Assistant Prof. Frank Persson (WET) is a specialist in microbial ecology of biofilm processes in drinking water, seawater and wastewater.

Senior Engineer Per Hagelia at NPRA, Norway, is an expert in concrete degradation mechanisms with a PhD on this topic. Per is also the initiator of the proposed PhD project.

### THE JOINT RESEARCH GROUP

The PhD student will be integrated in a joint biofilm research group at WET, Chalmers and CMB, University of Gothenburg (Bioresource Labs). The following group members have particular relevance for the project:

Prof. Malte Hermansson, dept. of Chemistry and Molecular Biology (CMB), University of Gothenburg is an expert in biofilm microbial ecology, including MIC.

Assistant Prof. Oskar Modin (WET) is an expert in bio-electrochemical systems.

The members of the Bioresources Labs have together a long experience in working with microbial aggregates and biofilms within wastewater treatment but also drinking water treatment and marine environments. This background is relevant since many of the mechanisms and processes involved are to a large extent similar to the biofilm formation to be studied in this project. Our expertise includes aggregation behavior of microbial cells, surface and colloidal chemistry, microbial conversion mechanisms of organic matter, nutrients and inorganic compounds such as iron and manganese. Besides the group has vast experience in molecular tools relevant to the proposed project. At the moment we run projects together within the field of aerobic granular sludge, anammox biofilms, nitrification biofilms, bioelectrochemical cells.

#### **EXTERNAL COLLABORATIONS**

Prof. Karin Lundgren, Civil and Environmental Engineering, Chalmers, leads a research group on concrete structures, with emphasis on e.g. deterioration processes. This group has an important competence for our project, which is available within the same department at Chalmers.

Prof. Karsten Pedersen, Civil and Environmental Engineering, Chalmers, is an authority within the field of geomicrobiology in deep underground aquifers.

Dr. Robert Almstrand, dept. of Civil and Environmental Engineering, Colorado School of Mines, is a specialist in advanced biofilm hybridization- and visualization methods.

Assoc. Prof. Holger Daims, dept. of Microbial Ecology, University of Vienna, is a leading authority in the field of CLSM and digital image analysis.

## **METHODOLOGY AND EQUIPMENT**

#### **QUANTITATIVE PCR (qPCR)**

A number of primers for taxonomical and functional genes are available for identification and quantification of corrosion related microorganisms, including iron oxidizing *zeta-proteobacteria* (FeOB), manganese oxidizing bacteria (MOB) such as *Leptothrix* sp., sulfate reducing bacteria (SRB) and sulfate oxidizing bacteria (SOB) [12, 13, 29]. At WET and CMB we have thorough experience of using qPCR for identification and quantification of gene targets in environmental samples [30, 31] [32].

#### **NEXT GENERATION SEQUENCING (NGS)**

Sequencing on the MiSeq Illumina platform will be performed at the Genomics core facility at the Sahlgrenska Academy. At WET we are presently using MiSeq for analyzing the V4 region of the 16S rRNA gene in multiple environmental samples (96 samples per run).

#### **FLUORESCENCE IN SITU HYBRIDIZATION AND CONFOCAL LASER SCANNING MICROSCOPY (FISH-CLSM)**

At the joint research group at WET and CMB, GU we have long tradition of using FISH-CLSM and digital image analysis, e.g. [26, 33]. Oligonucleotide FISH probes are available for a number of corrosion related microorganisms including SOB, SRB, FeOB and MOB, for details see ProbeBase [34]. For novel microorganisms, probes can be designed, as long as sequence information is available. CLSM will be performed at the Core center for Cellular Imaging at the Sahlgrenska Academy, where we have a long-standing collaboration. The method Gold-FISH will be set-up in association with Robert Almstrand,

Colorado School of Mines, where they recently have implemented this method for SEM of environmental samples.

#### **MICROELECTRODE MEASUREMENTS**

Measurements of gradients of pH, oxygen, H<sub>2</sub>S and redox will be carried out using Unisense microelectrodes (Unisense A/S, Denmark). At WET we have previous experience of microelectrode measurements, see e.g. [35], but have no access to equipment which can be operated in the field. Since microelectrode measurements need to be performed on the actual biofilm in the tunnels, we plan to purchase such equipment within this project.

#### **SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM)**

At WET we have used SEM for biofilm visualization in several projects, most recently on anodes and cathodes from microbial fuel cells, in association with the dept. of Chemical and Biological Engineering at Chalmers. SEM enables imaging of samples at their normal state, i.e. wet and uncoated and both organic and inorganic elements can be visualized at high resolution. To the extent necessary SEM data from Norwegian work may be included.

#### **THE NPRA DURABLE CONSTRUCTIONS SAMPLING PROGRAM**

Extensive sampling and analysis to evaluate the extent of corrosion at the Oslofjord tunnel test site will be performed during 2015, after 5 years of exposure. Besides analysis of water composition, pH, redox potential etc. analyses include sulfate, chloride, nitrogen species, TOC as well as a range of elements including heavy metals by ICP-MS. Moreover, exposed concrete test samples and concrete from sprayed concrete test fields will be tested for standard concrete properties. Samples of precipitates, concrete debris etc. will be analyzed by SEM and XRD as outlined in [5]. The PhD candidate at Chalmers will have full access to these results as well as other results from the R&D program “Durable constructions”.

#### **PLAN FOR SCIENTIFIC DELIVERABLES**

Results from the research project will be presented in international peer-reviewed journals and at international conferences.

#### **DESCRIPTION OF THE SOCIETAL VALUE OF THE RESEARCH**

In Norway there are more than 30 subsea tunnels and more are planned. In most of them, sprayed concrete is applied to increase safety. Also worldwide, many such tunnels exist. Building and maintenance of tunnels is very costly and deterioration of the sprayed concrete is therefore a major concern. The understanding of the degradation of steel reinforced concrete due to biofilm formation is very limited and increased knowledge in this area is therefore needed. Due to its complexity it is necessary to work multi-disciplinary, including studies of the microbial community structure by using advanced high throughput molecular techniques in combination with geochemical analysis and other tools such as microsensors to get a comprehensive picture of the prevailing conditions under different environmental loads. This will ultimately increase the understanding for how to prevent biofilm formation on the sprayed concrete surface and hence reduce the deterioration of the material.

The project will also contribute to the build-up of a strong research group within this area both in Norway and Sweden and it will also lead to the education of one PhD. Besides, master students will be recruited for the project as it requires extensive sampling.

## PLAN FOR COMMUNICATION WITH STAKEHOLDERS

To be able to increase knowledge among the stakeholders and end users, it is important to communicate the results from research projects performed at the university. The results will be continuously presented at the homepage for the Vegvesen-E39 project (under construction). Apart from this the results will be presented in different branch magazines both in Norway and Sweden. One example is the magazine *Byggeindustrien* where an article has been published this year about our planned project (Bakterier angriper sprøytebetong, nr 11, 2014). Seminars will also be held at Chalmers and at Statens Vegvesen (Norwegian Public Road Administration) in Norway.

## REFERENCES

1. Hagelia, P., *Deterioration mechanisms and durability of sprayed concrete for rock support in tunnels*. 2011, TU-Delft, The Netherlands. 205 pp. + appendices. <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Ad64b8ff8-8d68-4eea-a320-73148e9f1b15/>
2. Hagelia, P., *Interaction of abiotic and biochemical reactions and their role in concrete deterioration*. Concrete, 2013. **July/August**: p. 49-51.
3. Okabe, S., et al., *Succession of sulfur-oxidizing bacteria in the microbial community on corroding concrete in sewer systems*. Applied and Environmental Microbiology, 2007. **73**(3): p. 971-980.
4. Hudon, E., S. Miza, and D. Frigon, *Biodeterioration of Concrete Sewer Pipes: State of the Art and Research Needs*. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2011. **2**(2): p. 42-52.
5. Hagelia, P. *Sprayed concrete in aggressive subsea environment – the Oslofjord Test Site*. in *6th International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*. 2011. Tromsø, Norway.
6. Taylor, H.F.W., *Cement chemistry (2nd ed.)*. 1997: Thomas Telford Publishing. 459.
7. Hamilton, W.A., *Microbially influenced corrosion as a model system for the study of metal microbe interactions: A unifying electron transfer hypothesis*. Biofouling, 2003. **19**(1): p. 65-76.
8. Satoh, H., et al., *Microbial community structures and in situ sulfate-reducing and sulfur-oxidizing activities in biofilms developed on mortar specimens in a corroded sewer system*. Water Research, 2009. **43**(18): p. 4729-4739.
9. Landoulsi, J., et al., *Enzymatic approach in microbial-influenced corrosion: a review based on stainless steels in natural waters*. Environ Sci Technol, 2008. **42**(7): p. 2233-42.
10. Weber, K.A., L.A. Achenbach, and J.D. Coates, *Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction*. Nat Rev Microbiol, 2006. **4**(10): p. 752-64.
11. Emerson, D., *Biogeochemistry and microbiology of microaerobic Fe(II) oxidation*. Biochem Soc Trans, 2012. **40**(6): p. 1211-6.
12. McBeth, J.M., et al., *Neutrophilic Iron-Oxidizing "Zetaproteobacteria" and Mild Steel Corrosion in Nearshore Marine Environments*. Applied and Environmental Microbiology, 2011. **77**(4): p. 1405-1412.
13. Dang, H.Y., et al., *Molecular characterization of putative biocorroding microbiota with a novel niche detection of Epsilon- and Zetaproteobacteria in Pacific Ocean coastal seawaters*. Environmental Microbiology, 2011. **13**(11): p. 3059-3074.
14. Javaherdashti, R., *Microbiologically Influenced Corrosion: an Engineering Insight*. 2008, London, UK: Springer-Verlag.
15. Amann, R.L., W. Ludwig, and K.H. Schleifer, *Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation*. Microbiol Rev, 1995. **59**(1): p. 143-69.
16. Vincke, E., N. Boon, and W. Verstraete, *Analysis of the microbial communities on corroded concrete sewer pipes--a case study*. Appl Microbiol Biotechnol, 2001. **57**(5-6): p. 776-85.
17. Dinh, H.T., et al., *Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms*. Nature, 2004. **427**(6977): p. 829-32.

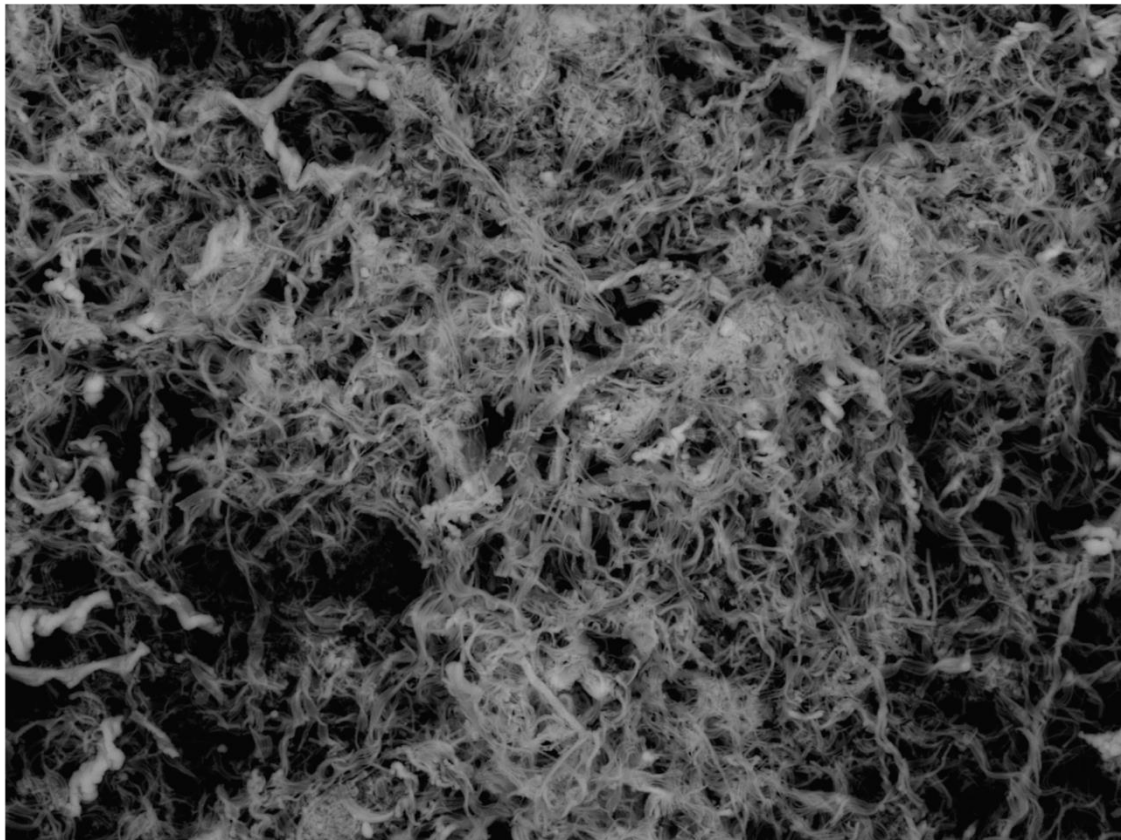
18. Cayford, B.I., et al., *High-throughput amplicon sequencing reveals distinct communities within a corroding concrete sewer system*. Appl Environ Microbiol, 2012. **78**(19): p. 7160-2.
19. Gomez-Alvarez, V., R.P. Revetta, and J.W.S. Domingo, *Metagenome analyses of corroded concrete wastewater pipe biofilms reveal a complex microbial system*. BMC Microbiology, 2012. **12**.
20. Caporaso, J.G., et al., *Ultra-high-throughput microbial community analysis on the Illumina HiSeq and MiSeq platforms*. ISME J, 2012. **Mar 8**: p. 1-4.
21. Haverkamp, T., *Personal communication*. 2014.
22. Legendre, P. and L. Legendre, *Numerical ecology*. 1998, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science BV.
23. Ramette, A., *Multivariate analyses in microbial ecology*. Fems Microbiology Ecology, 2007. **62**(2): p. 142-160.
24. Smith, C.J. and A.M. Osborn, *Advantages and limitations of quantitative PCR (Q-PCR)-based approaches in microbial ecology*. Fems Microbiology Ecology, 2009. **67**(1): p. 6-20.
25. Amann, R., B.M. Fuchs, and S. Behrens, *The identification of microorganisms by fluorescence in situ hybridisation*. Curr Opin Biotechnol, 2001. **12**(3): p. 231-6.
26. Almstrand, R., et al., *New methods for analysis of spatial distribution and coaggregation of microbial populations in complex biofilms*. Appl Environ Microbiol, 2013. **79**(19): p. 5978-87.
27. Daims, H. and M. Wagner, *In Situ Techniques and Digital Image Analysis Methods for Quantifying Spatial Localization Patterns of Nitrifiers and Other Microorganisms in Biofilm and Flocs*. Methods in Enzymology, Vol 46: Research on Nitrification and Related Processes, Pt B, 2011. **496**: p. 185-215.
28. Schmidt, H., T. Eickhorst, and M. Mussmann, *Gold-FISH: a new approach for the in situ detection of single microbial cells combining fluorescence and scanning electron microscopy*. Syst Appl Microbiol, 2012. **35**(8): p. 518-25.
29. Johnson, K.W., et al., *Increased Abundance of Gallionella spp., Leptothrix spp. and Total Bacteria in Response to Enhanced Mn and Fe Concentrations in a Disturbed Southern Appalachian High Elevation Wetland*. Geomicrobiology Journal, 2012. **29**(2): p. 124-138.
30. Persson, F., et al. *One-stage nitrification - anaerobic ammonium oxidation at low temperatures in a moving bed biofilm reactor*. . in IWA Holistic Sludge Management conference. 2013. Västerås, Sweden.
31. Astrom, J., et al., *Short-term microbial release during rain events from on-site sewers and cattle in a surface water source*. J Water Health, 2013. **11**(3): p. 430-42.
32. Persson, F., et al., *Structure and composition of biofilm communities in a moving bed biofilm reactor for nitrification-anammox at low temperatures*. Bioresour Technol, 2014. **154**: p. 267-73.
33. Persson, F., et al., *Distribution and activity of ammonia oxidizing bacteria in a large full-scale trickling filter*. Water Research, 2002. **36**(6): p. 1439-1448.
34. Loy, A., et al., *probeBase--an online resource for rRNA-targeted oligonucleotide probes: new features 2007*. Nucleic Acids Research, 2007. **35**(Database issue): p. D800-4.
35. Wilen, B.M., D. Gapes, and J. Keller, *Determination of external and internal mass transfer limitation in nitrifying microbial aggregates*. Biotechnol Bioeng, 2004. **86**(4): p. 445-57.



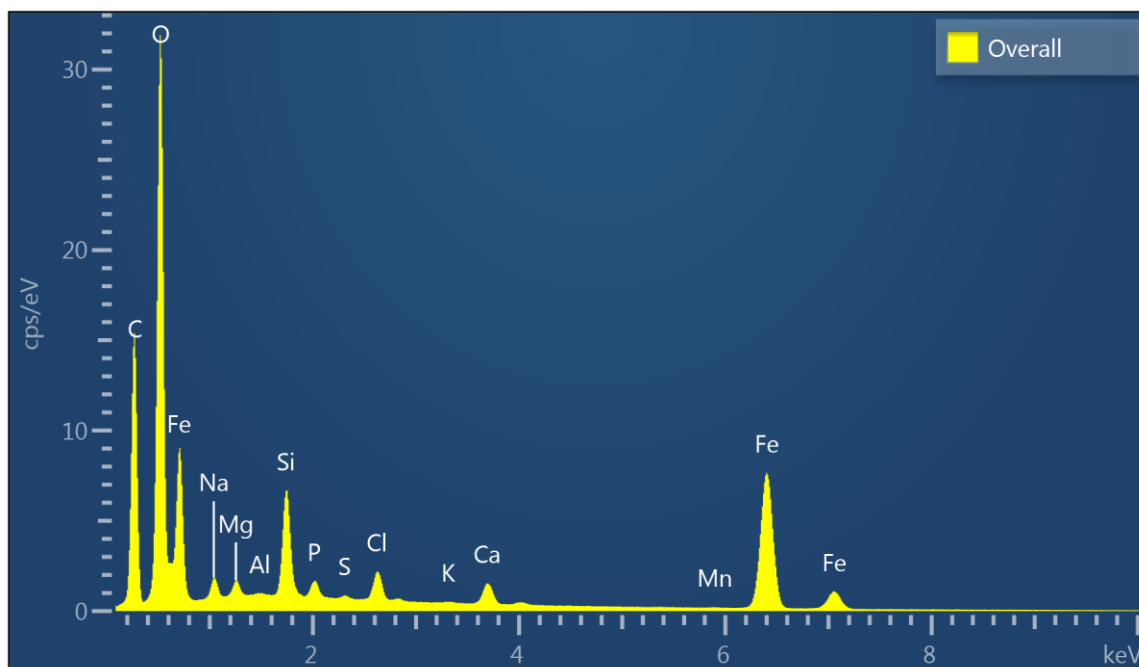
Kommentar:

I Karmøytunnelen, dannes det meget store mengder bakterier i tunneltaket som renner / drypper ned på baksiden av PE-vann- og frost-sikringen. Bildet er tatt ca. 3 -4 m opp over dreneringsgrusen. Bakterielaget er 1 - 2 cm (!) tykt og det over en tunnallengde på 5 m, anslår jeg. I dette området er det relativt stor innlekasje av sjøvann.

Slime, 15 kV, overall



10µm

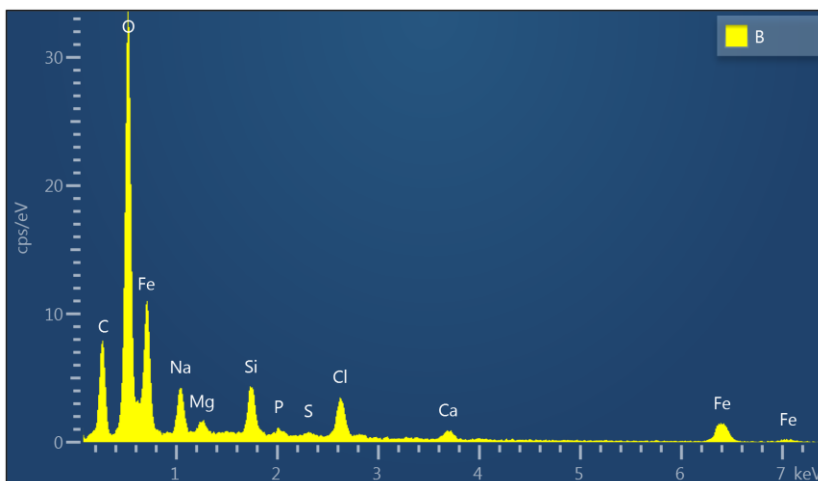
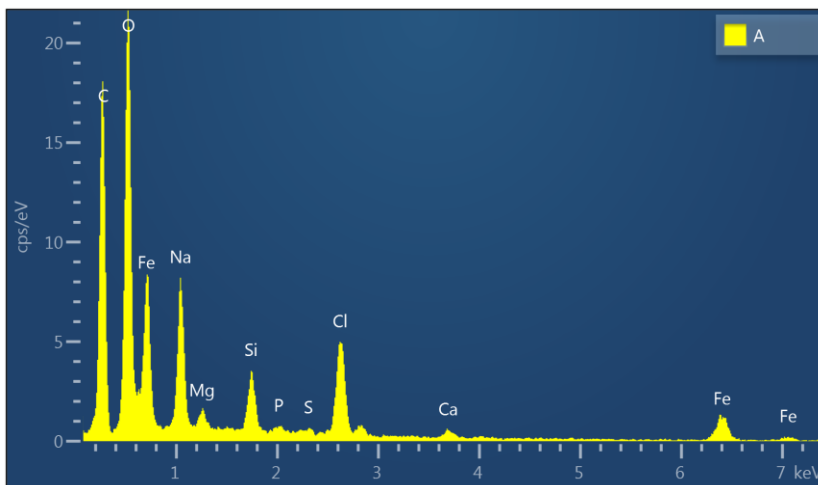
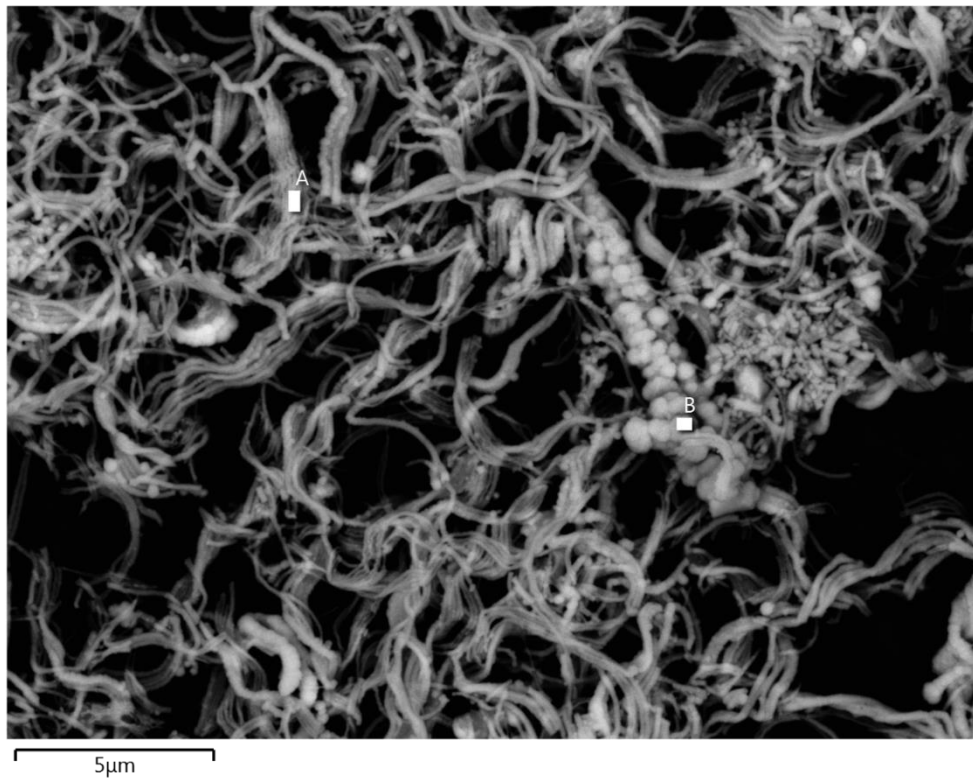


Kommentar:

Noe rød-orange slam ble smurt ut på en karbon-tape, og satt til tørking. En tynn film av karbon ble dampet på prøven for å sikre elektrisk ledning ved undersøkelse i SEM/EDS. Bilde og spektrum viser «overall» inntrykk/sammensetning. Mye jern, men kun spor av mangan.



Slime, dried

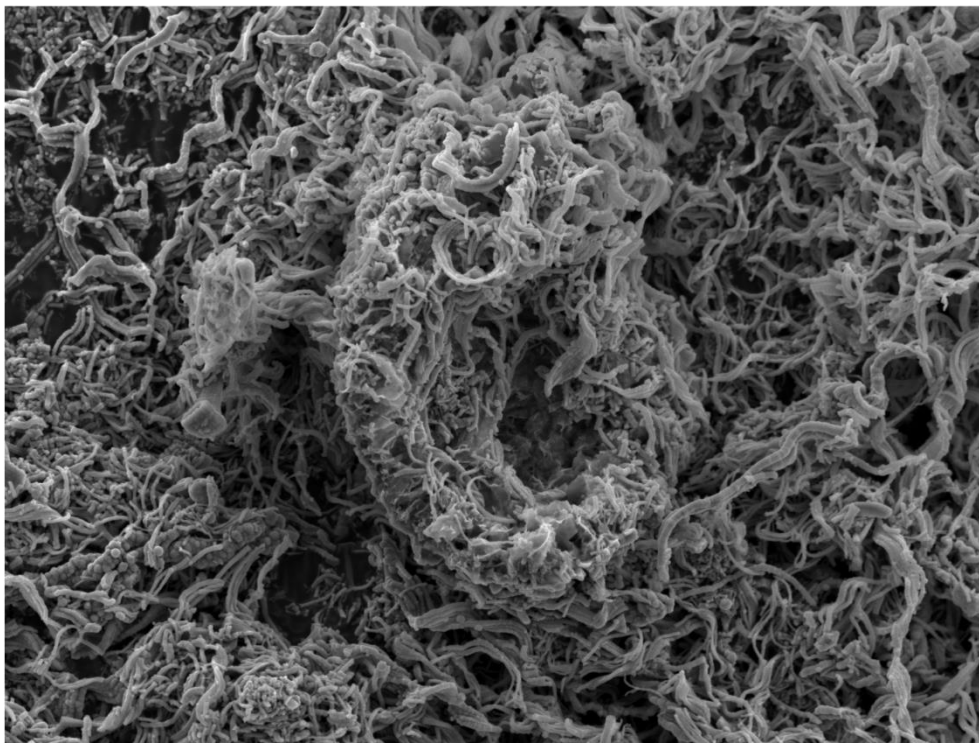


Kommentar:

Prøven består hovedsakelig av krøllede fiber-lignende detaljer samt noen tykkere stave med små kuler på seg.

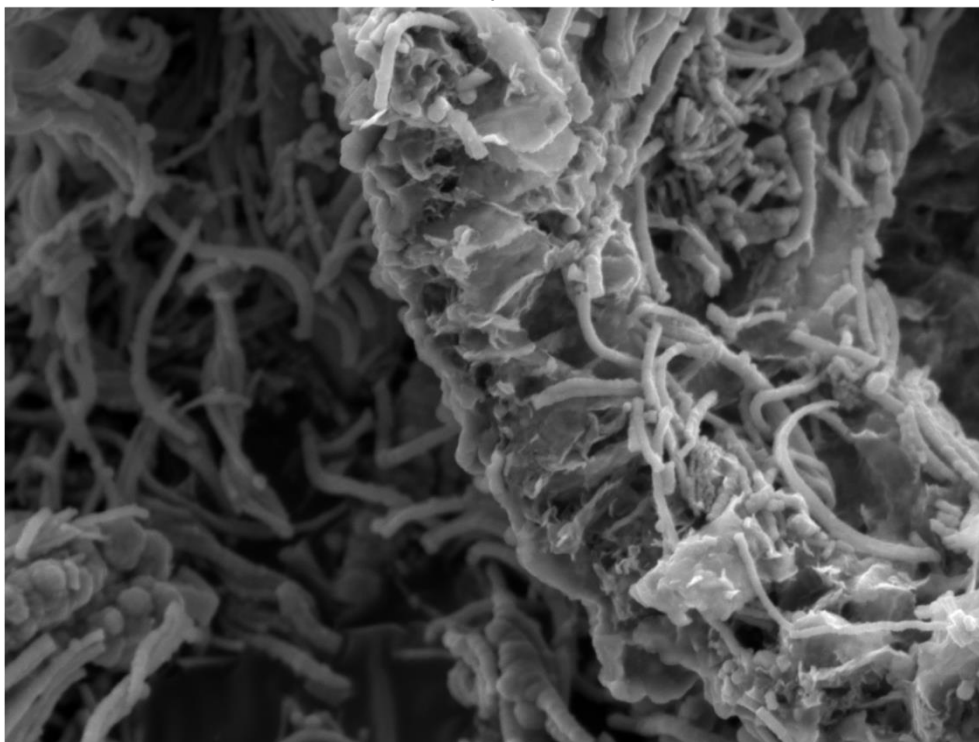
Begge typer viser jernoksid og salt.

Slime, dried



10µm

Slime, dried

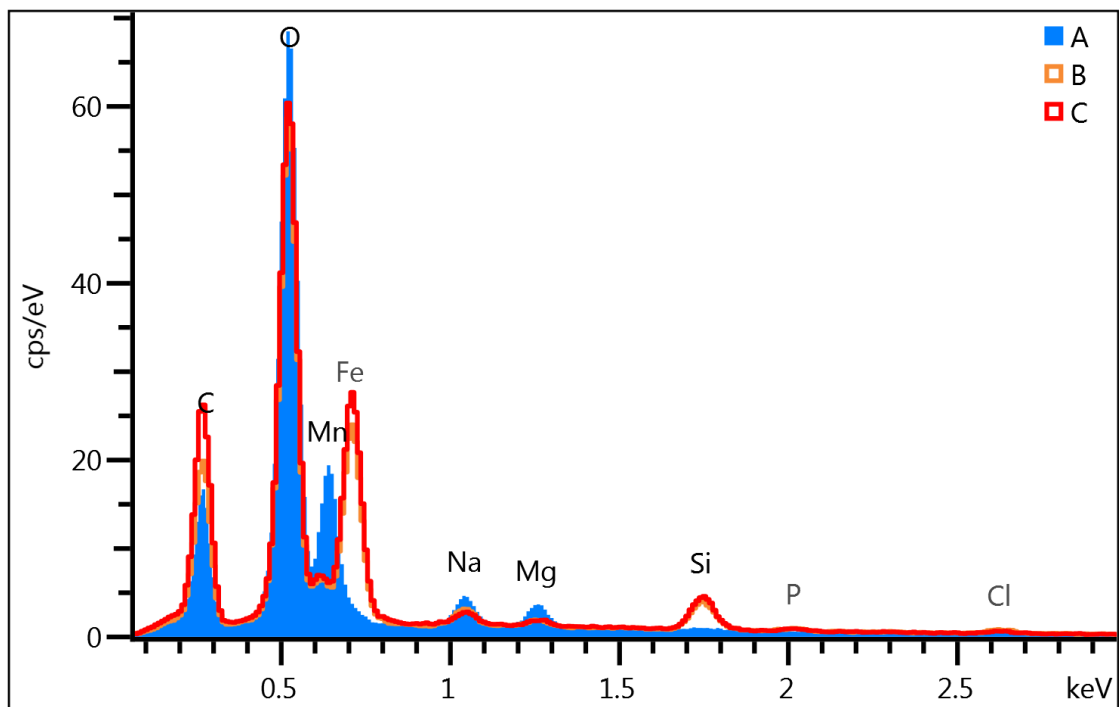
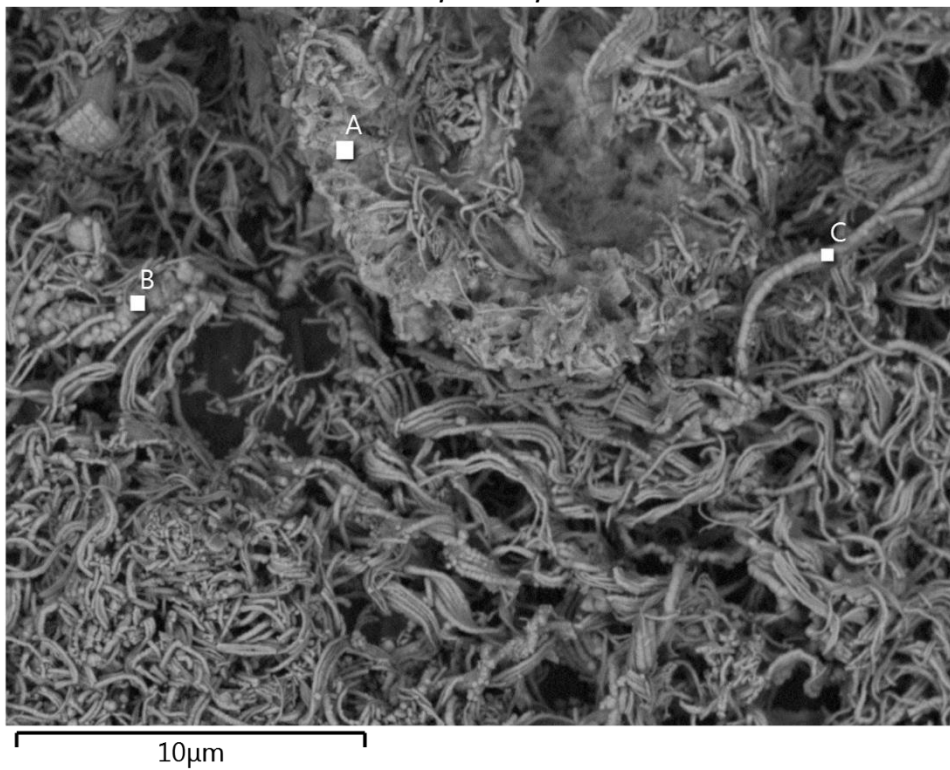


2.5µm

Kommentar:

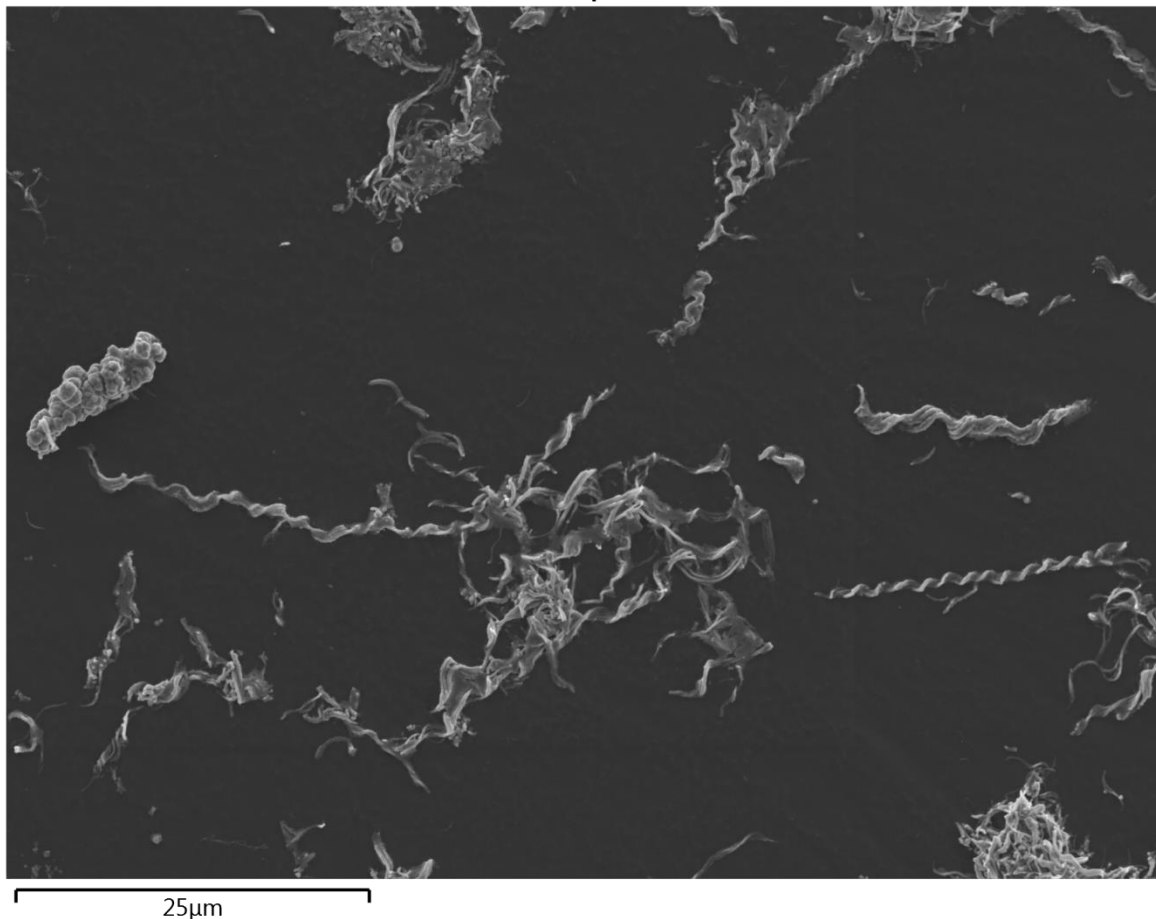
Skålform/smultringform som inneholder Mn-oxid. Se neste side.

Slime, dried, BSE



Smultringen inneholder Mn-oxid, i motsetning til fibrillene og kulene som inneholder Fe-oxid.

Dried water droplet from slime



Kommentar:

Fra den samme prøven av rød-orange slam ble det tatt en væskeformig prøve. Denne ble lagt på en karbon-tape og tørket. Igjen ble prøven pådampet en tynn film av karbon. Undersøkelse i SEM viser enkelt «fibere» som er vridde, og noen tykkere staver med en masse små kuler på overflaten.

Dried water droplet from slime, SE



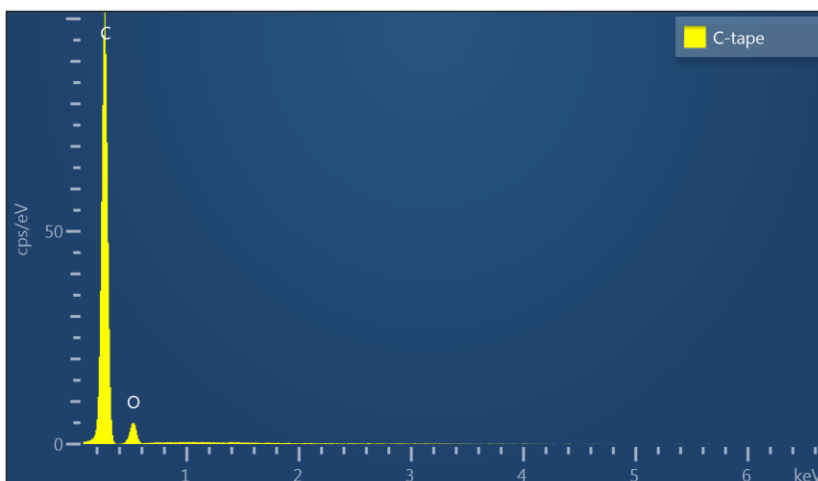
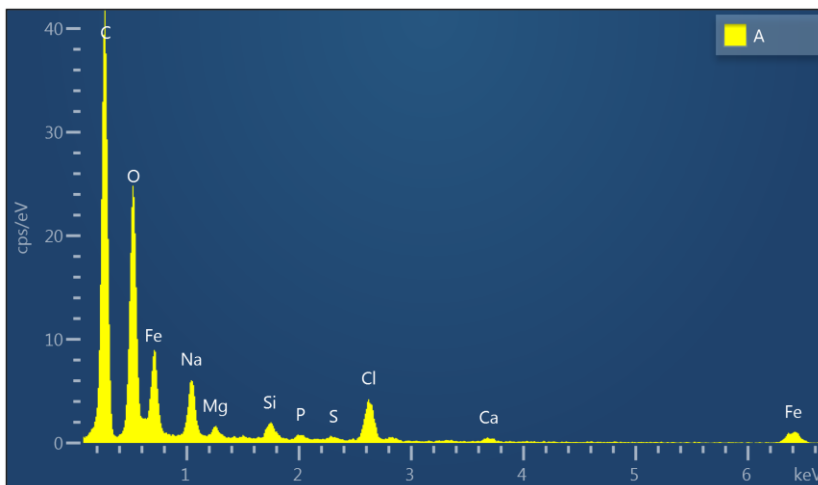
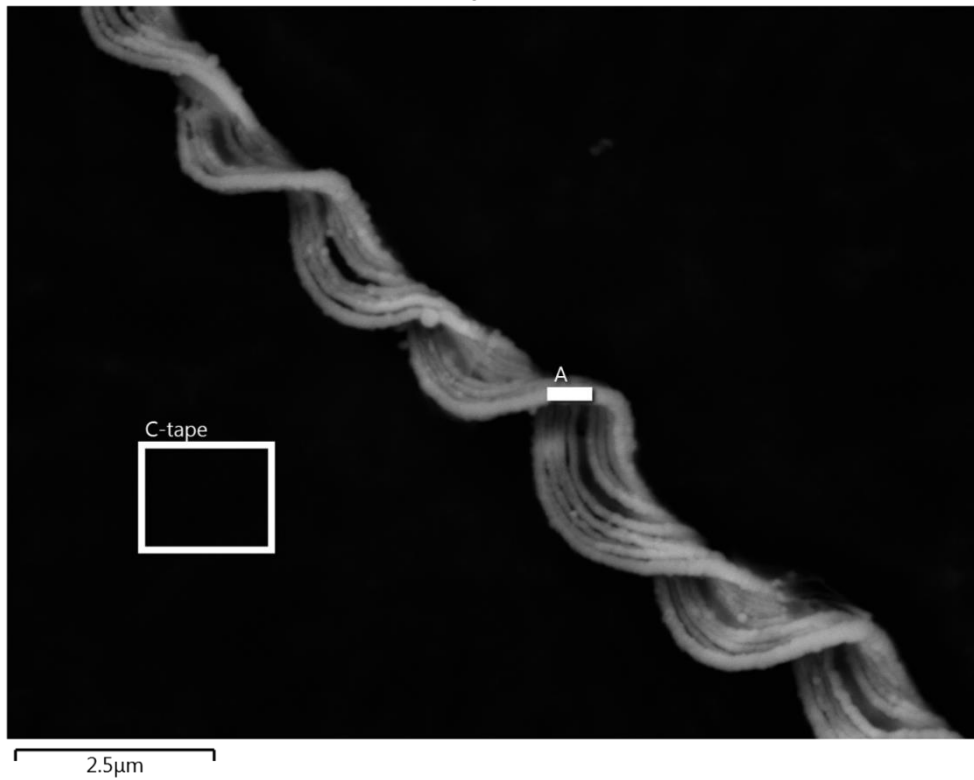
Dried water droplet from slime, BSE



Kommentar:

De vridde fibrene består av flere tynne fibriller.

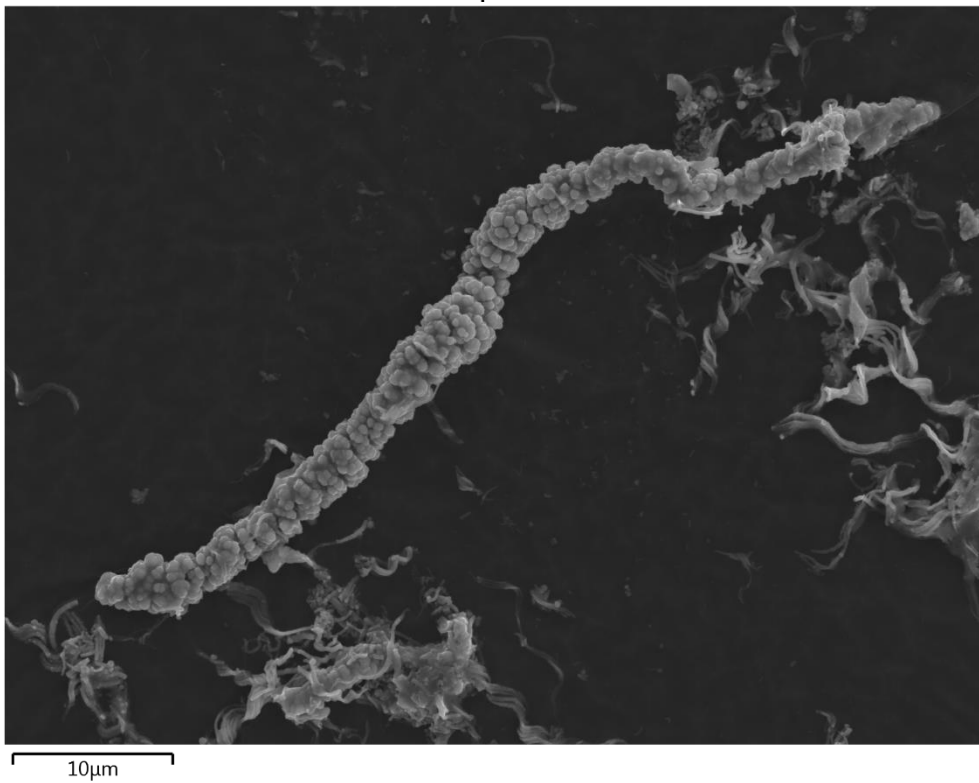
Dried water droplet from slime, BSE



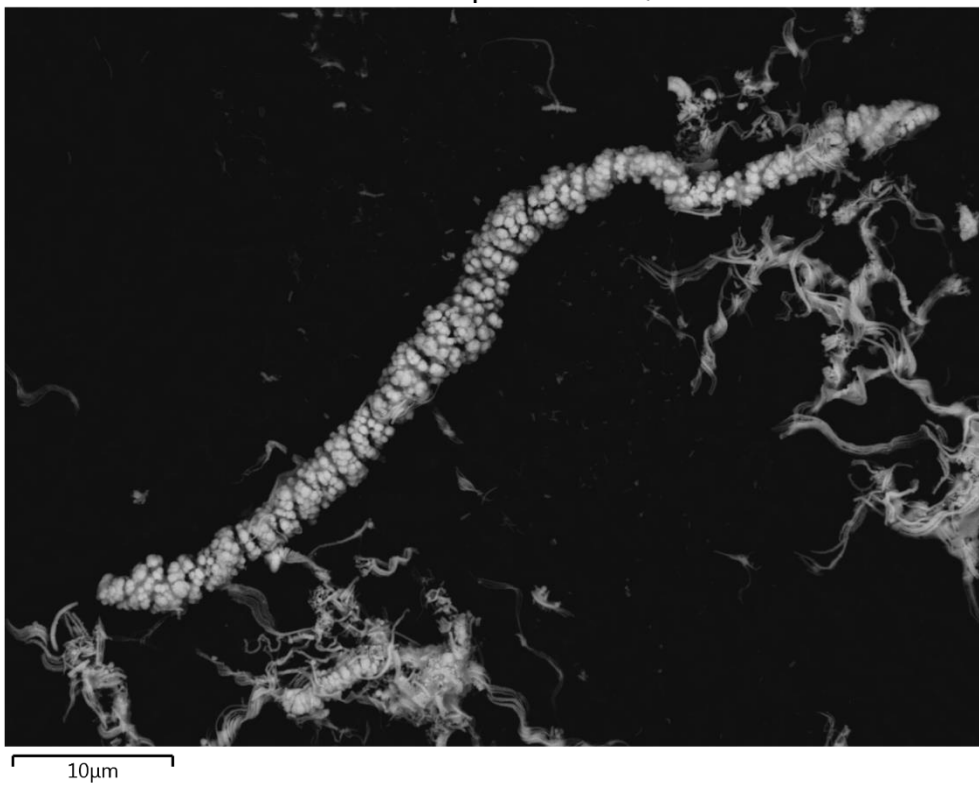
Kommentar:

De vridde fibrene har mye jern-  
oksid og salt i seg. Spektrum fra  
karbon-tape er vedlagt for  
referanse.

Dried water droplet from slime, SE



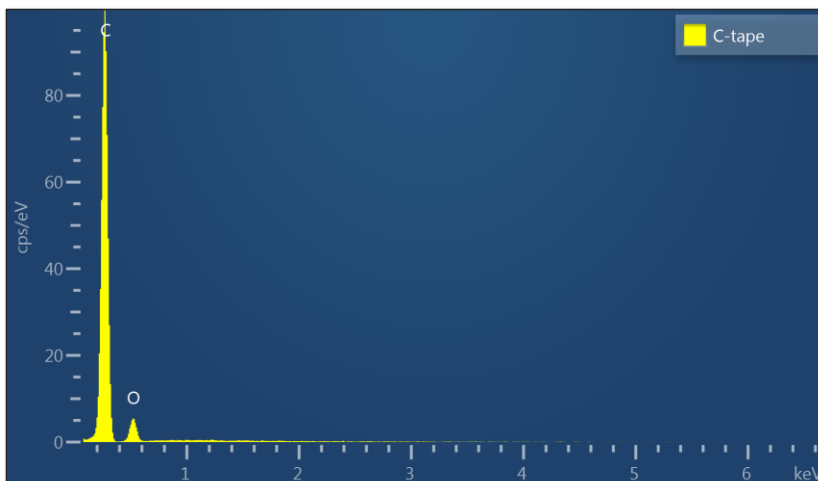
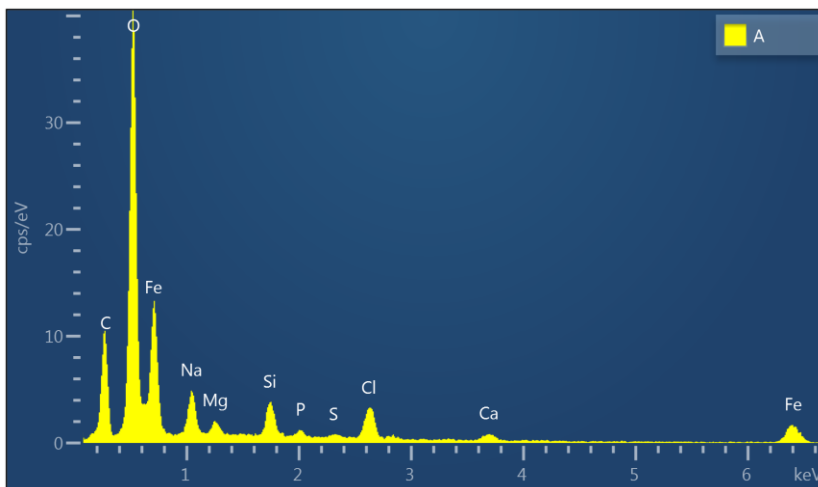
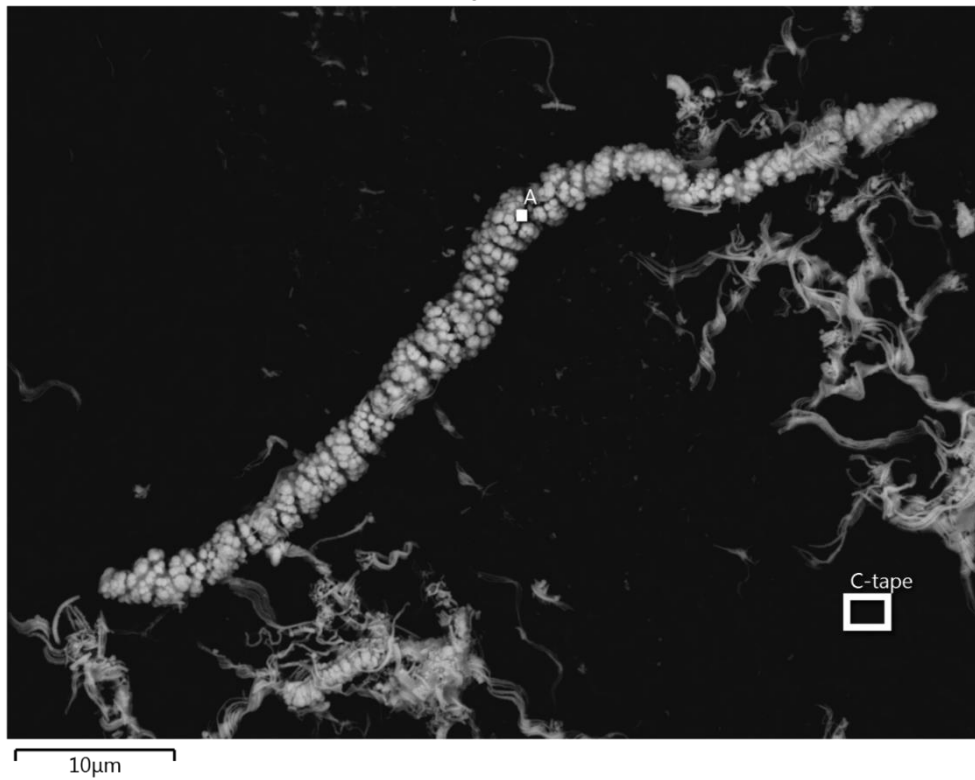
Dried water droplet from slime, BSE



Kommentar:

Eksempel på tykkere fiber med mange små runde kuler på overflaten.

Dried water droplet from slime, BSE



Kommentar:

De tykkere fibrene med små  
runde kuler inneholder også mye  
jern-oxid og salt.



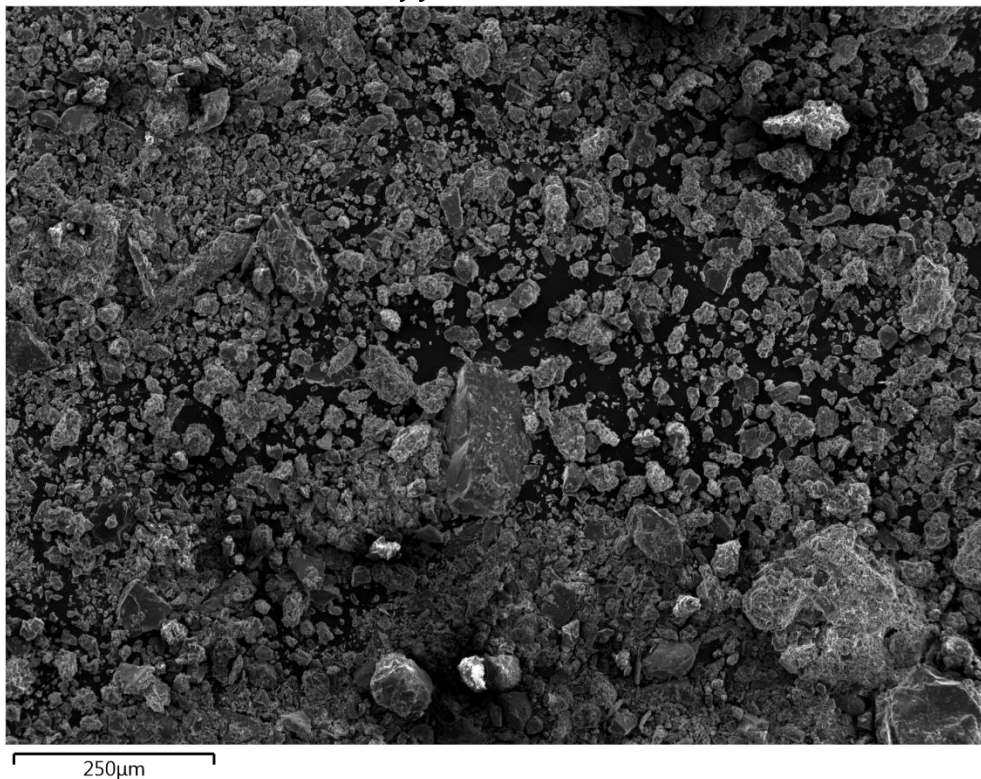
Rådata fra slamundersøkelsene i Byfjord- og Mastrafjordtunnelene.

Generelt kan det vel sies at dette støvet ikke inneholder lettløselige salter som kan akselerere eventuell korrosjon.

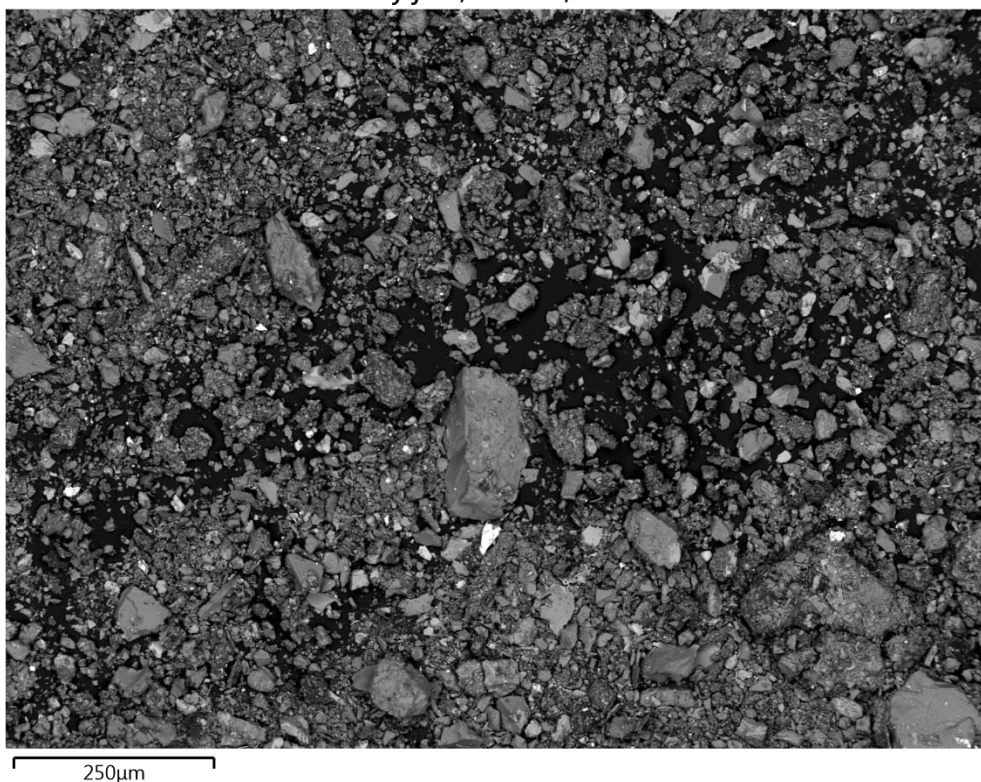
Støvet vil naturligvis holde på tilført fukt, og det som måtte være av løste ioner i dette (Cl, NO<sub>x</sub>, SO<sub>4</sub> etc.), men utgjør høyst sannsynlig ingen bekymringsfull innflytelse på tunnelenes korrosjonsforhold. Skal det trekkes noen konklusjoner må det bli: Tunnelvask er viktig – fjern støv!

Hvorvidt disse støvprøvene er representative for tunneler i sin alminnelighet, vites ikke, men er ikke sannsynligheten stor?

Byfjord, oversikt, SE



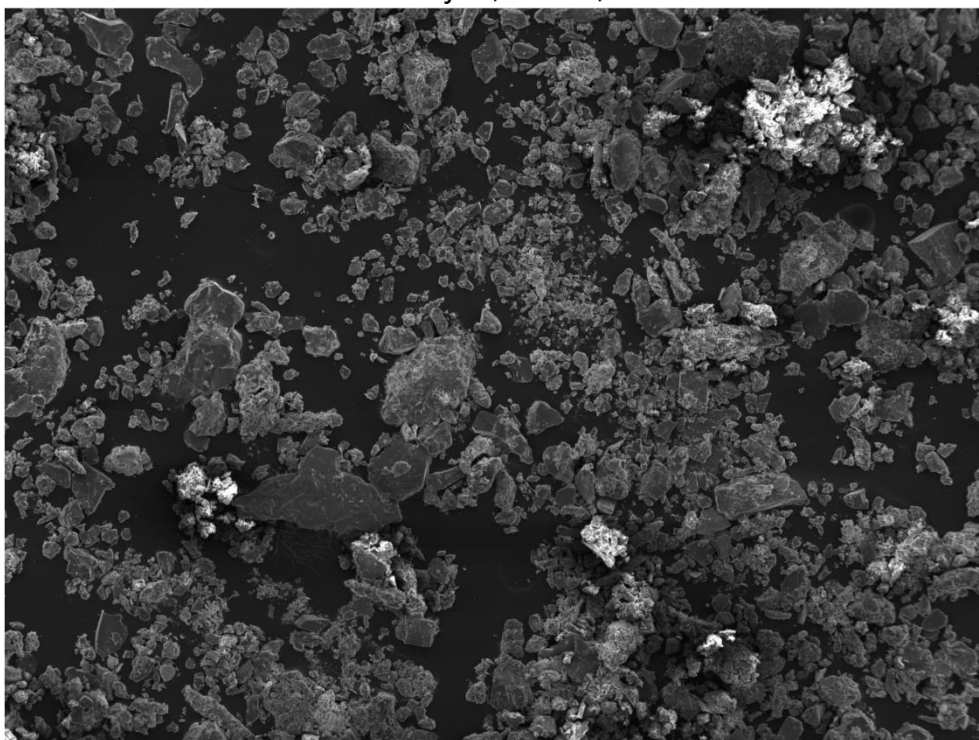
Byfjord, oversikt, BSE



Kommentar:

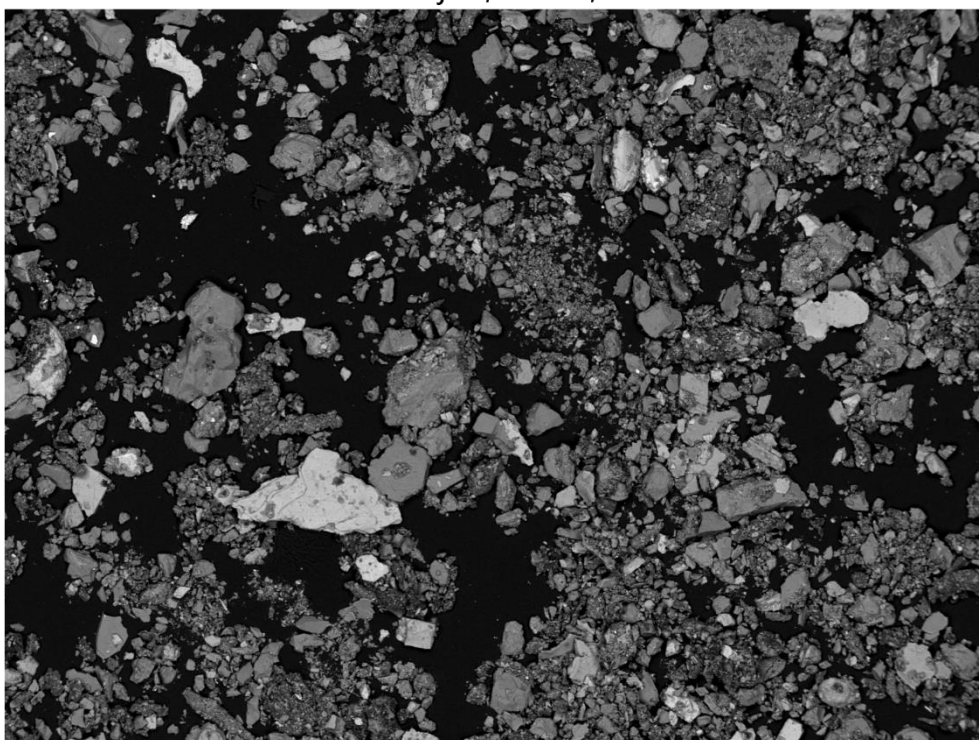
Slam fra Byfjordtunnelen ble tørket og montert på en karbonteip for undersøkelse i elektronmikroskop, SEM. Før montering av prøven ble typiske organiske komponenter som gress/flis/barnåler fjernet. Prøven består for det meste av mineralske partikler, typisk partikkelstørrelse er fra 0,5 µm og oppover til 300 µm (0,3 mm). Det øvre bildet viser topografisk kontrast, det nedre viser atomnummerkontrast.

Mastrafjord, oversikt, SE



250µm

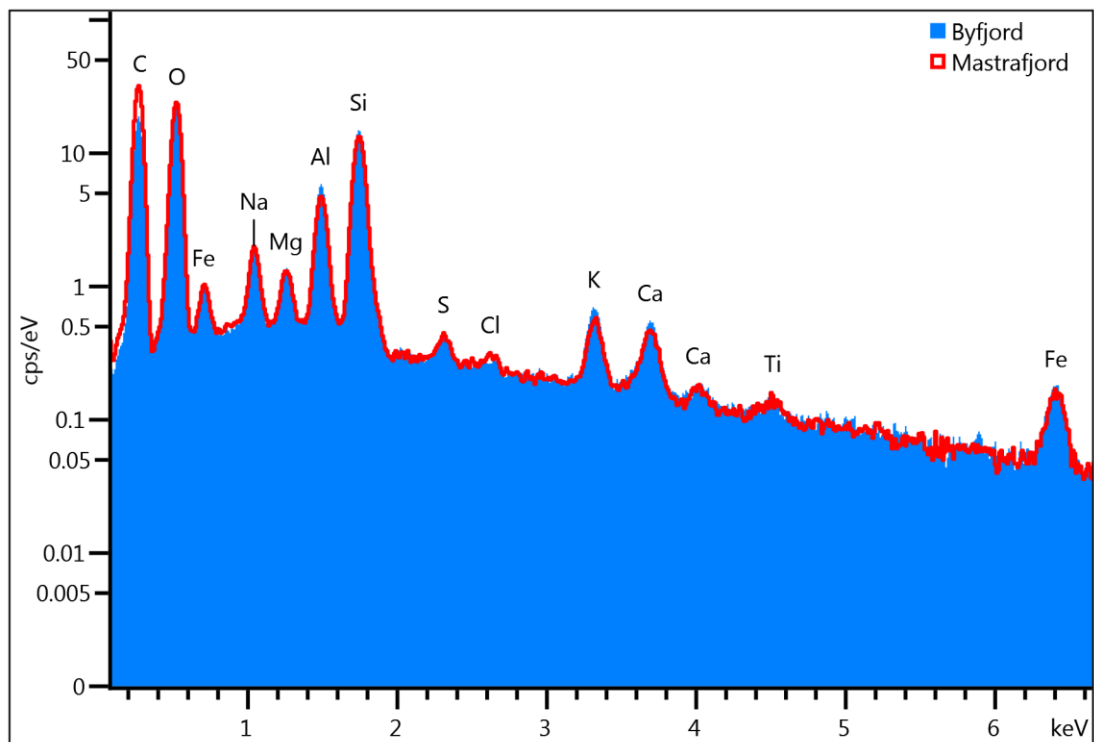
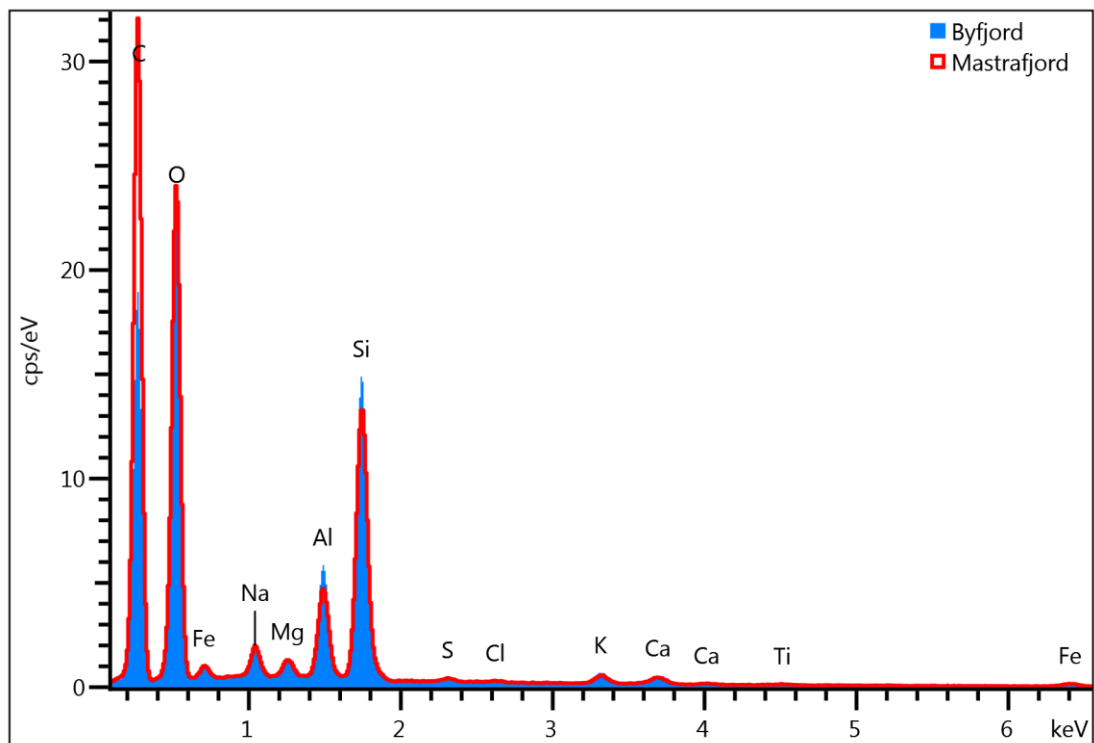
Mastrafjord, oversikt, BSE



250µm

Kommentar:

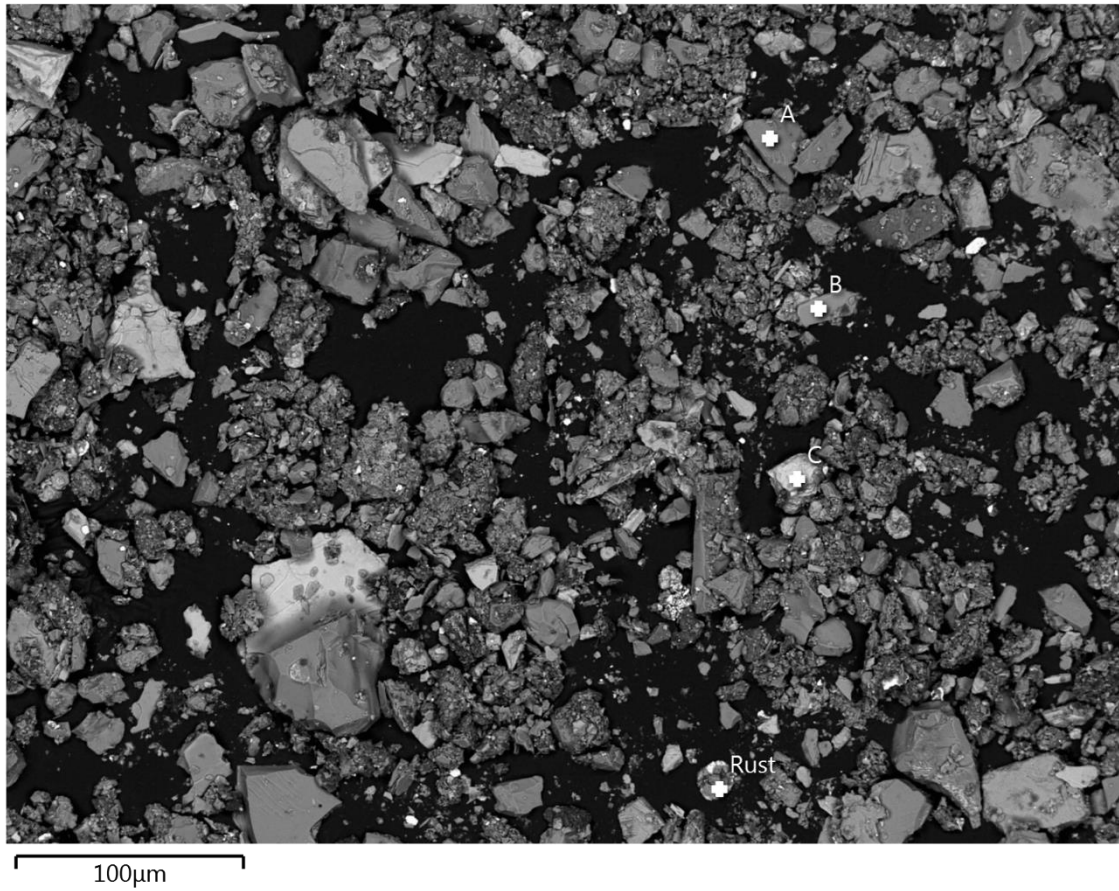
Slam fra Mastrafjordtunnelen ble tørket og montert på en karbonteip for undersøkelse i elektronmikroskop, SEM. Før montering av prøven ble typisk organiske komponenter som gress/flis/barnåler fjernet. Prøven består for det meste av mineralske partikler, typisk partikkelstørrelse er fra 0,5 µm og oppover til 300 µm (0,3 mm). Det øvre bildet viser topografisk kontrast, det nedre viser atomnummerkontrast.



Kommentar:

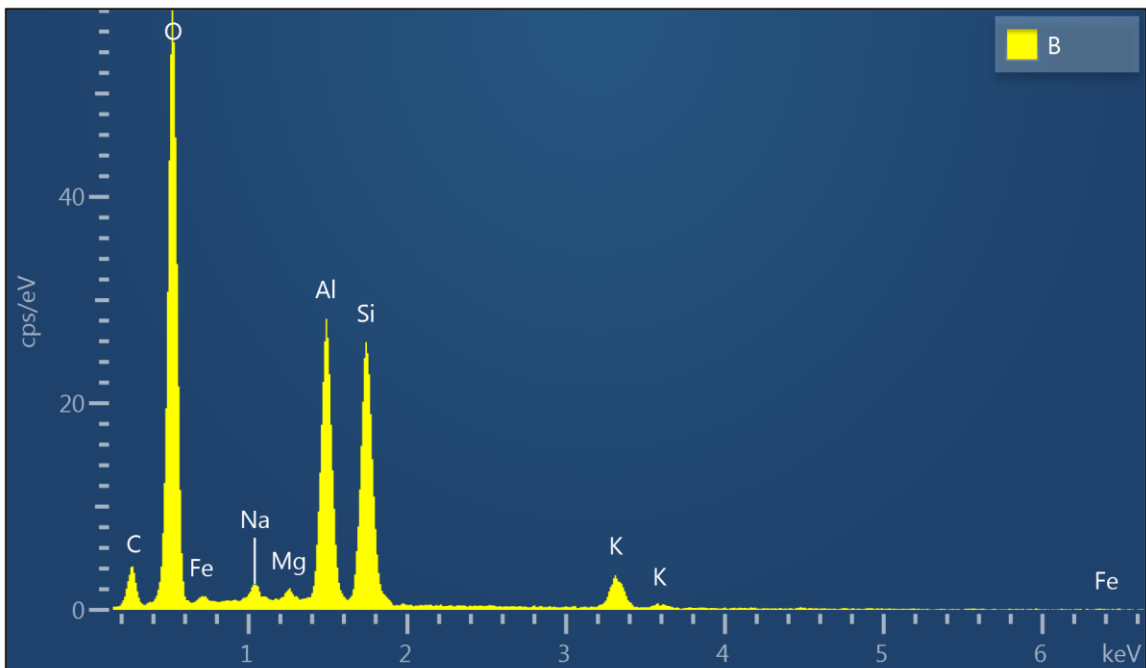
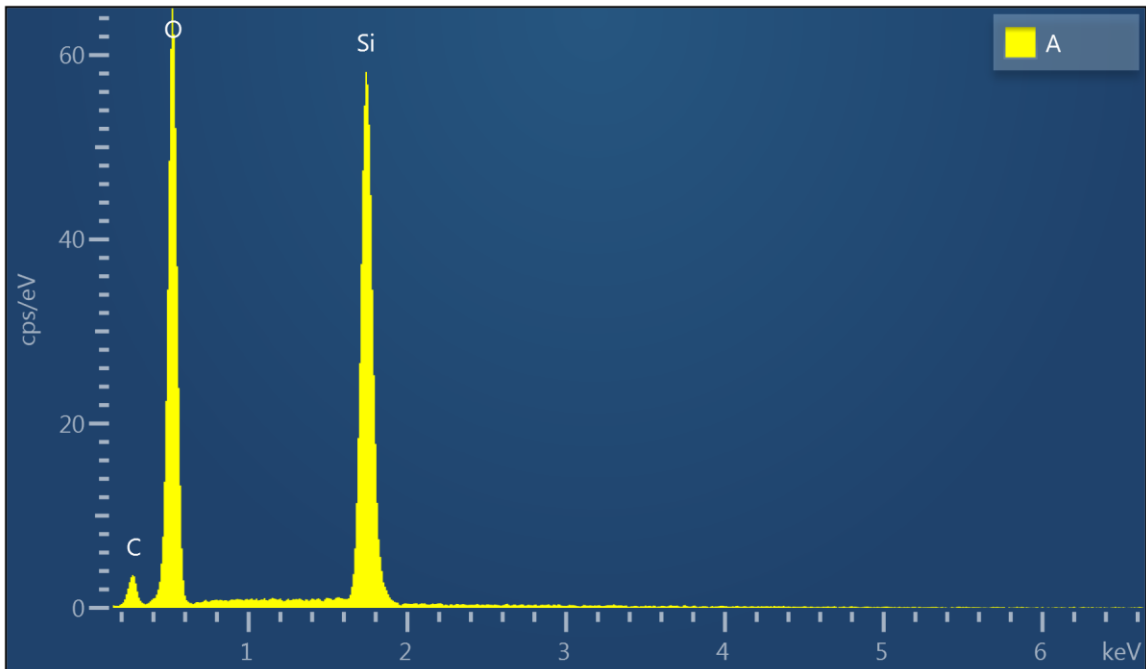
Kjemien i slammet ble påvist ved hjelp av Energi Dispersiv røntgen Spektroskopi, EDS, i SEM. Sammensetningen ser lik ut i prøvene fra de to tunnelene. Spektrumet fra Mastrafjordtunnelen, viser noe mer karbon, men det skyldes at slammets dekningsgrad på karbonteipen er noe mindre her en på prøven fra Byfjordtunnelen, i.e. mer karbonsignal. Begge diagrammer viser samme spektra, men presentert med hhv. lineær og logaritmisk intensitetsakse. Ingen av enkelt partiklene undersøkt senere i dokumentet viser klor. Klor antas derfor å ha vært i løsning i væsken som er fordampet bort.

Byfjord



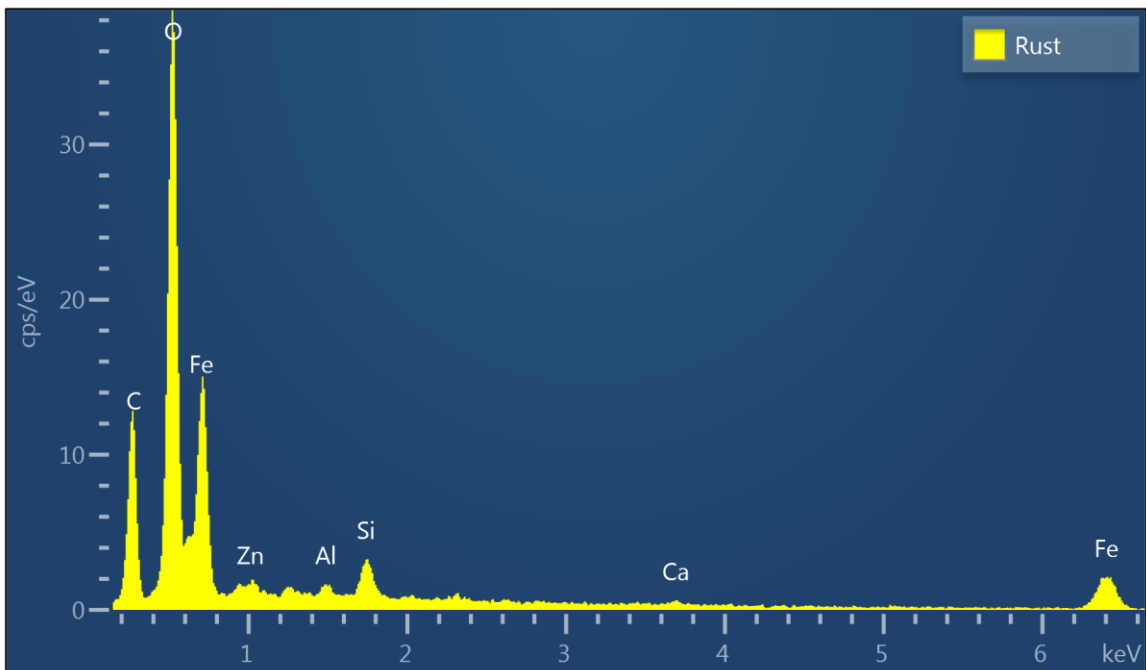
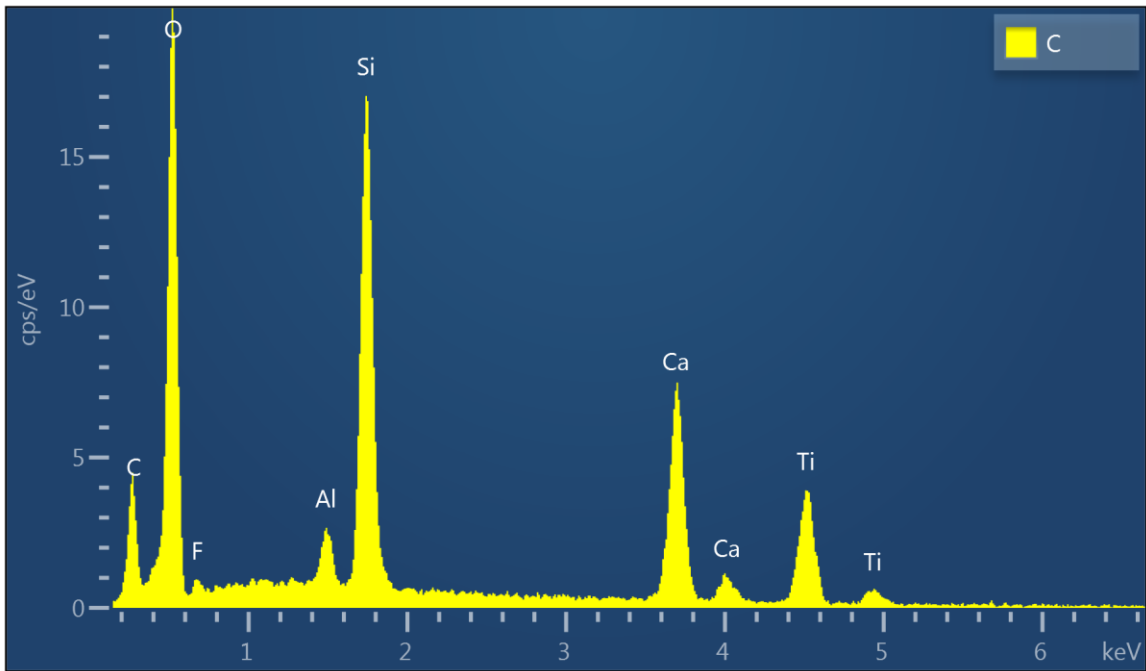
Kommentar:

EDS punktanalyser er gjort på enkelt partikler i slammet. Spektra fra partiklene markert med bokstaver, er vist på de neste 2 sidene.



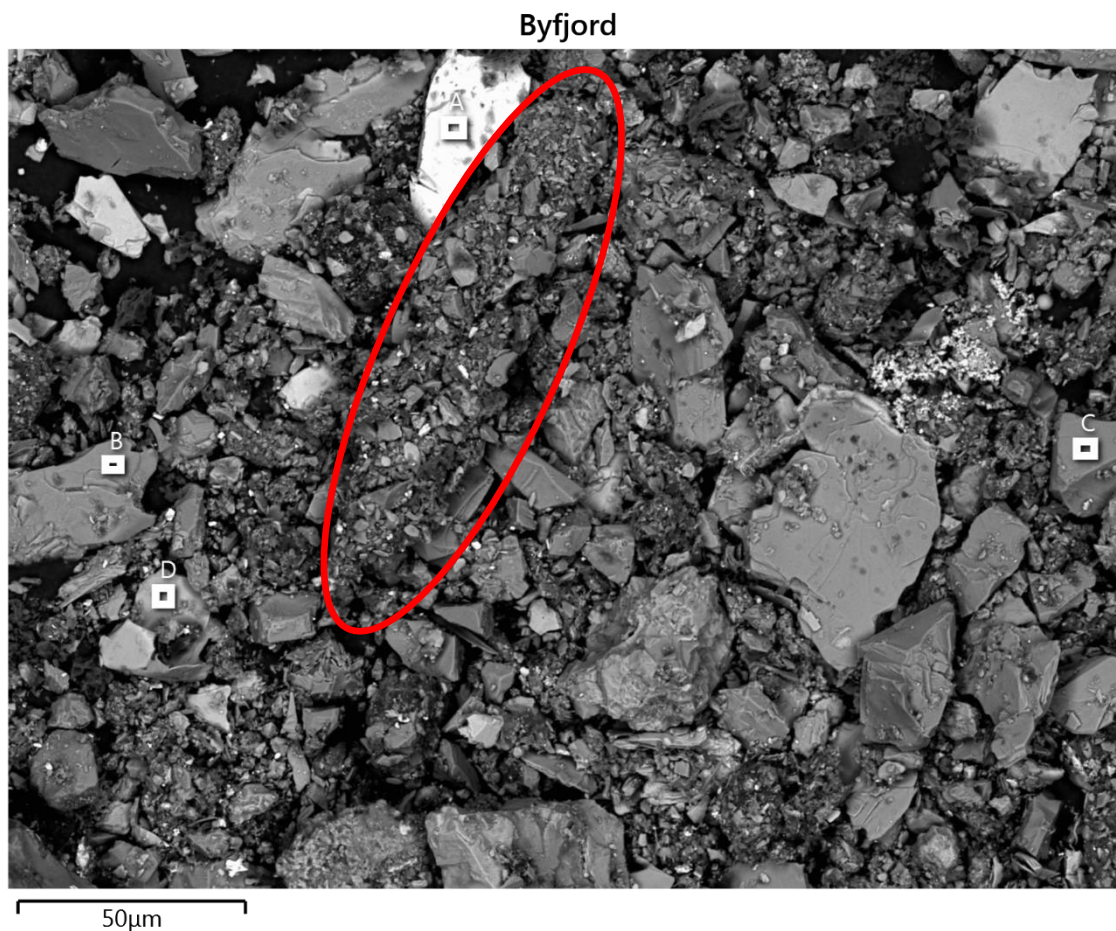
Kommentar:

Byfjordtunnelen: Spektrum A viser kvarts, som utgjør en betydelig del av slammet. Partikkeltype B er det også mye av; -feltspat med mye Al og lite Si, eller noe helt annet?



Kommentar:

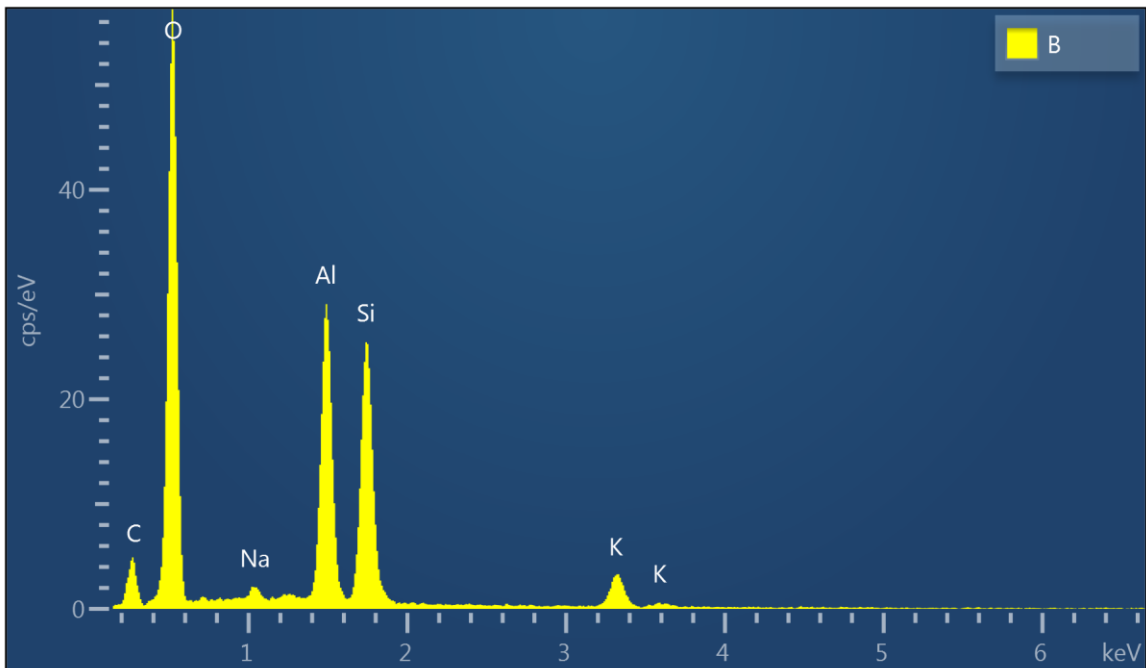
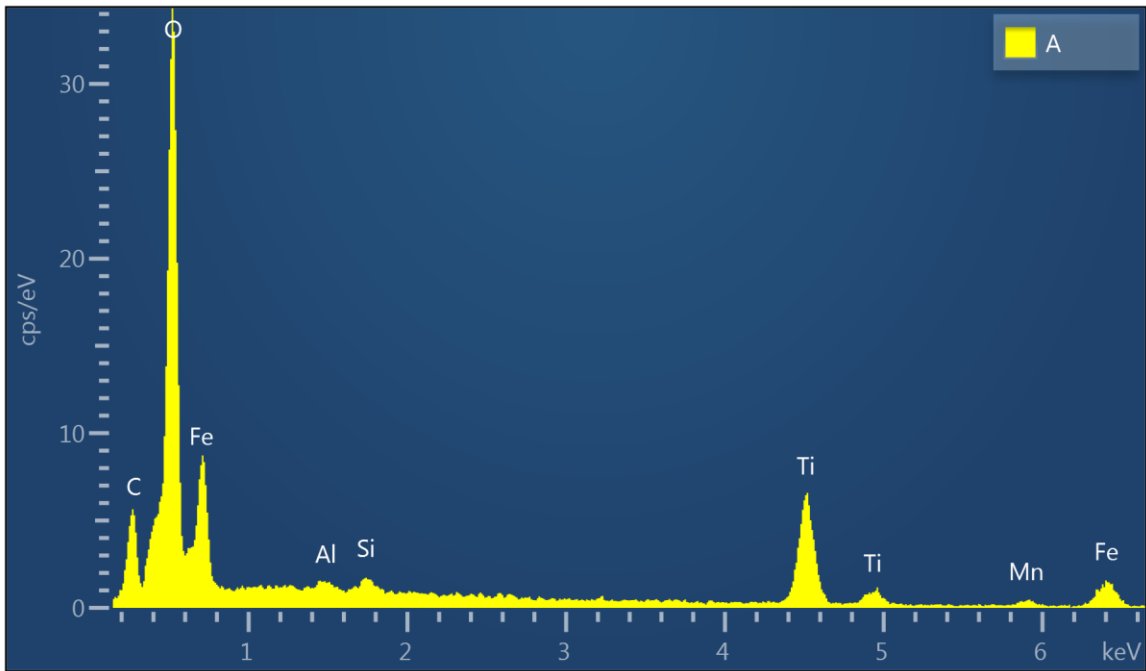
Byfjordtunnelen: Spektrum C viser en partikkeltype som det forekommer noe mindre av i prøven, men den er ikke uvanlig. Det finnes også litt rust/jernoksid.



Kommentar:

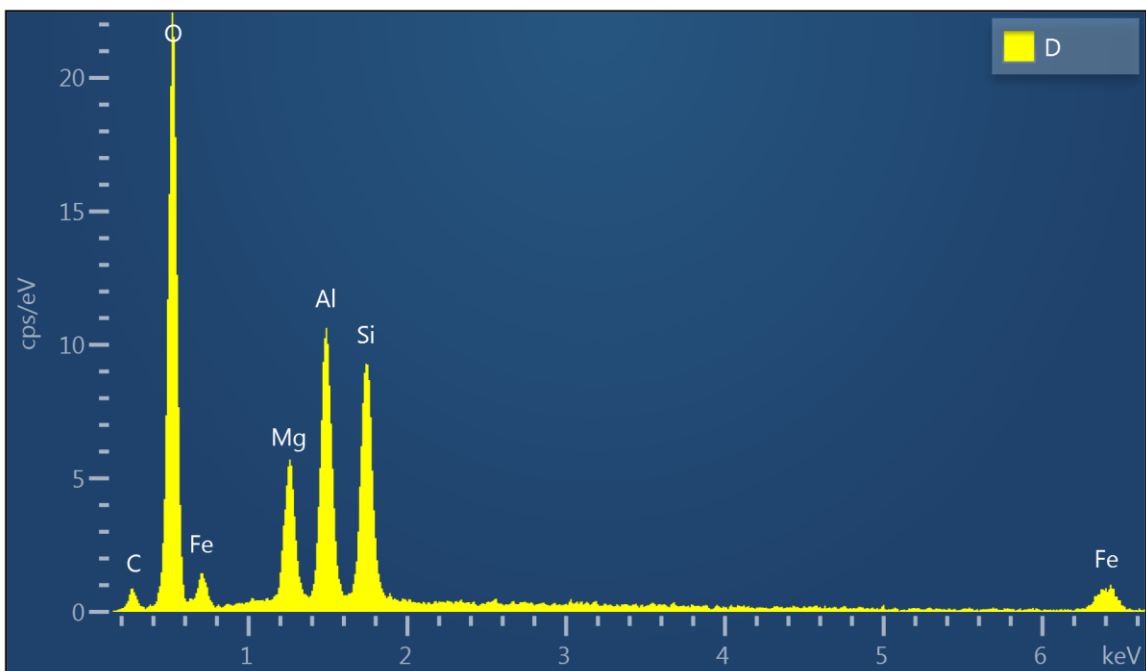
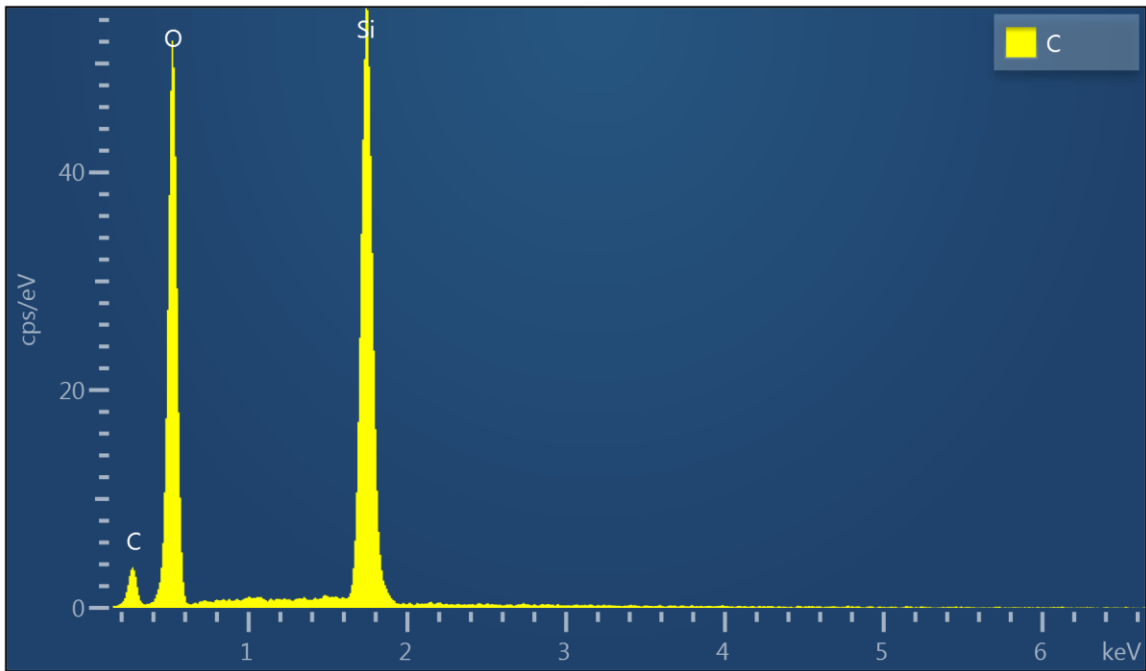
EDS punktanalyser er gjort på enkelt partikler i slammet. Spektra fra partiklene markert med bokstaver, er vist på de neste 2 sidene. Agglomerat, markert med rødt, er asfalt eller gummi med masse små sammenkittede mineralsk partikler i seg.





Kommentar:

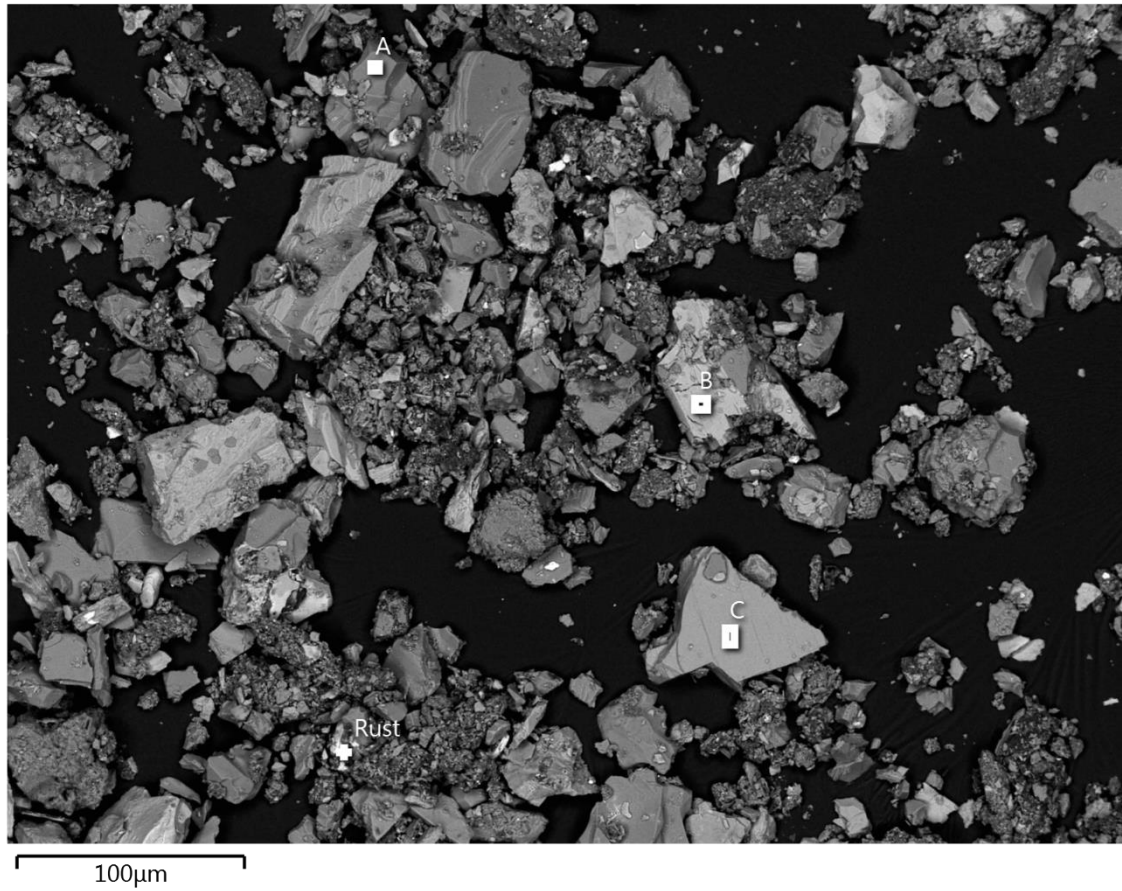
Byfjordtunnelen: Spektrum A viser ilmenitt eller  $\text{TiO}_2$ , om det er det siste, kan det være fra vegmerking (hvitt pigment). Partikkeltype B er det også mye av; -feltspat med mye Al og lite Si, eller noe helt annet?



Kommentar:

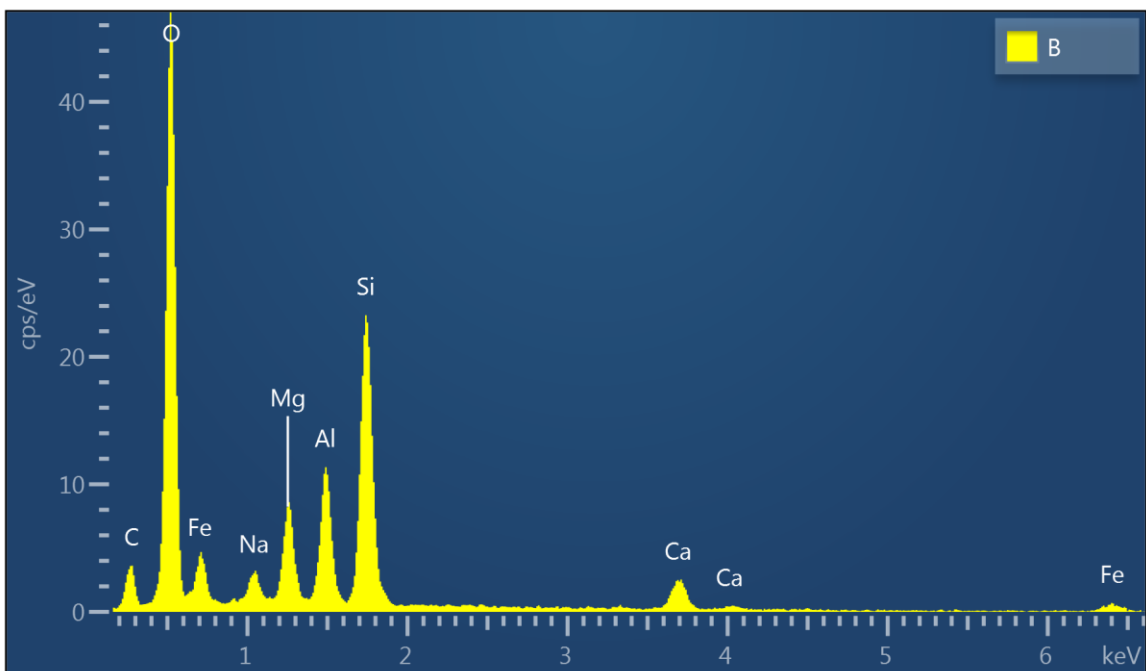
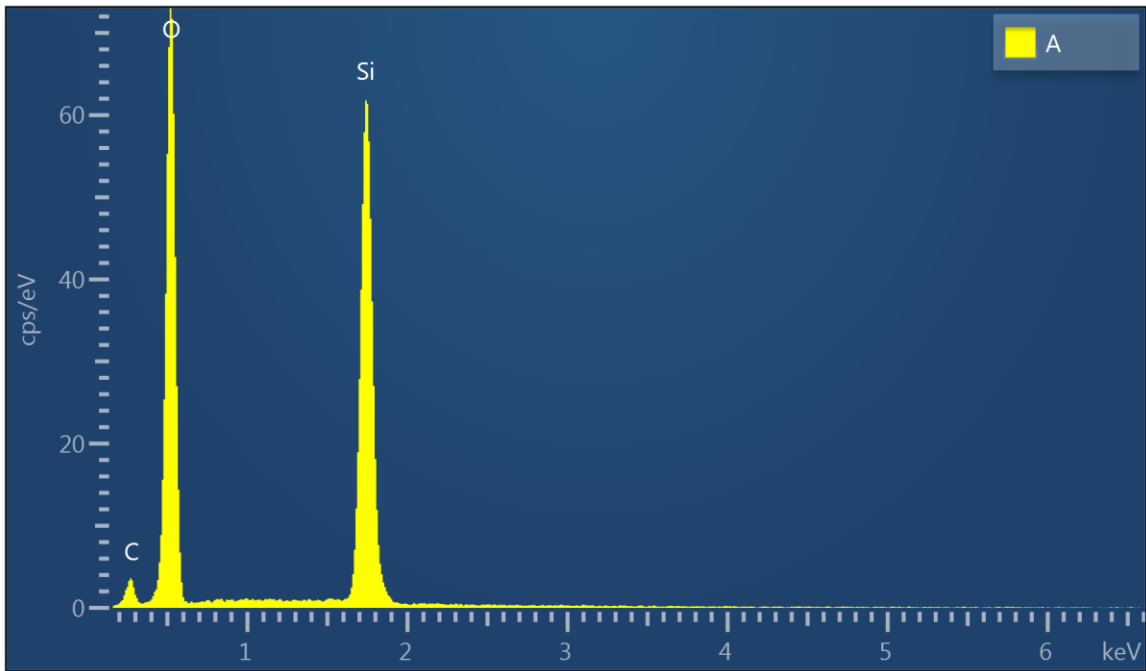
Byfjordtunnelen: Partikkeltype D er det også mye av.

Mastrafjord



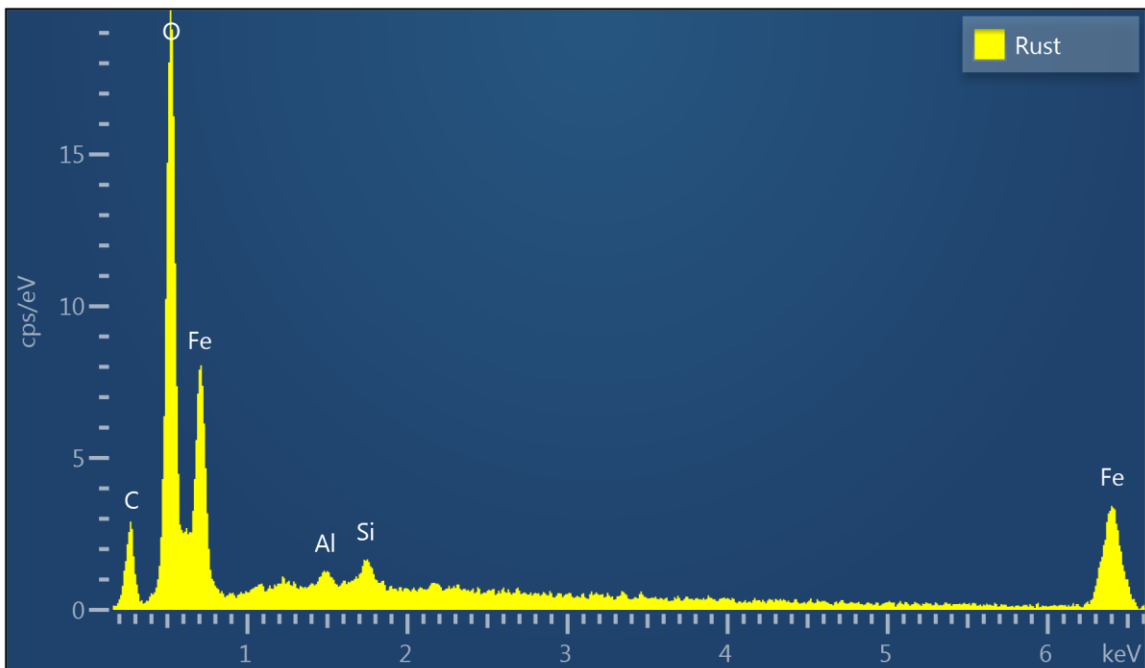
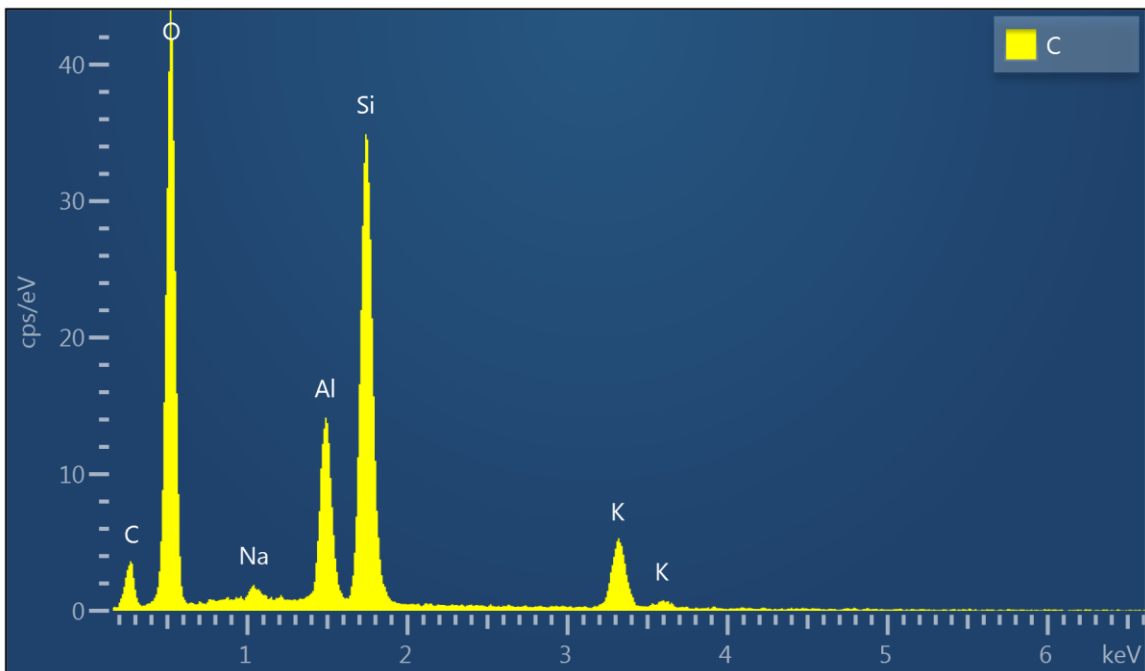
Kommentar:

EDS punktanalyser er gjort på enkelt partikler i slammet. Spektra fra partiklene markert med bokstaver, er vist på de neste 2 sidene.



Kommentar:

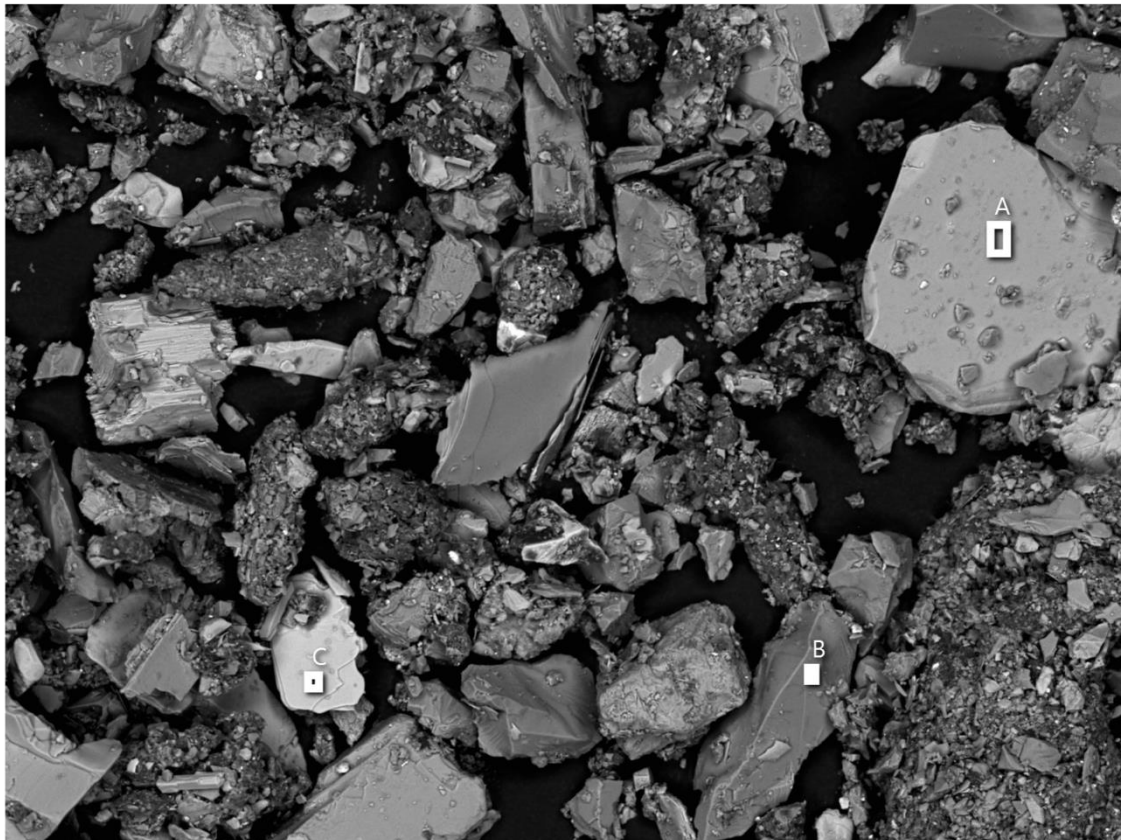
Mastrafjordtunnelen: Spektrum A viser kvarts, som utgjør en betydelig del av slammet. Partikkeltype B er også hyppig forekommende.



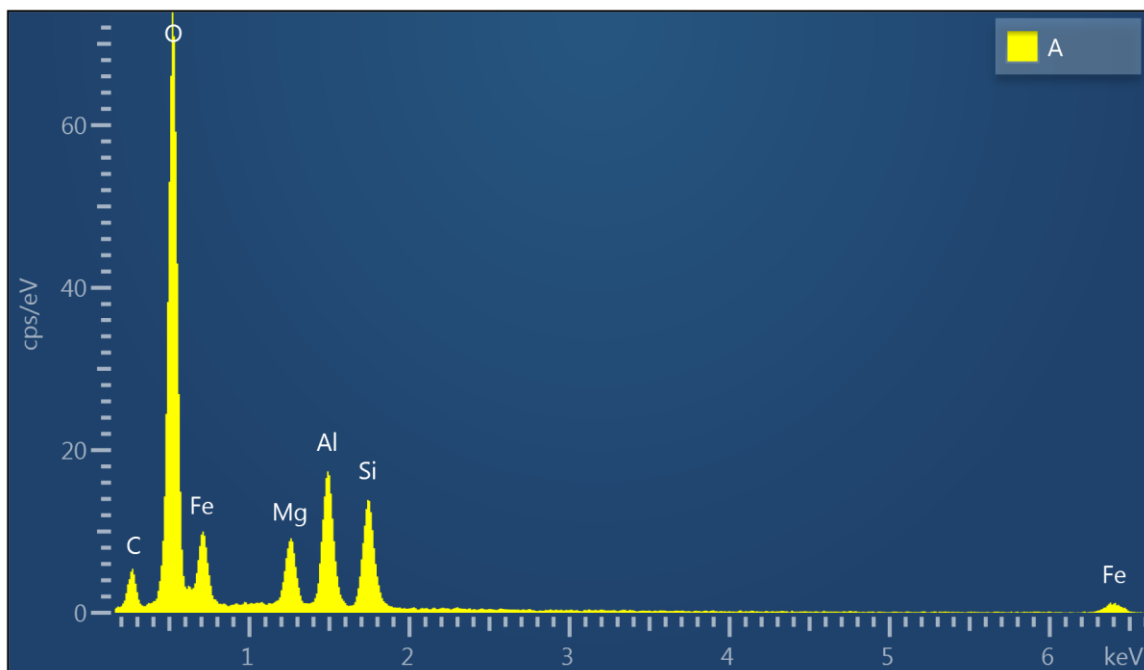
Kommentar:

Mastrafjordtunnelen: Spektrum C viser feltspat som det er mye av i slammet. Det finnes også litt rust/jernoksid.

Mastrafjord

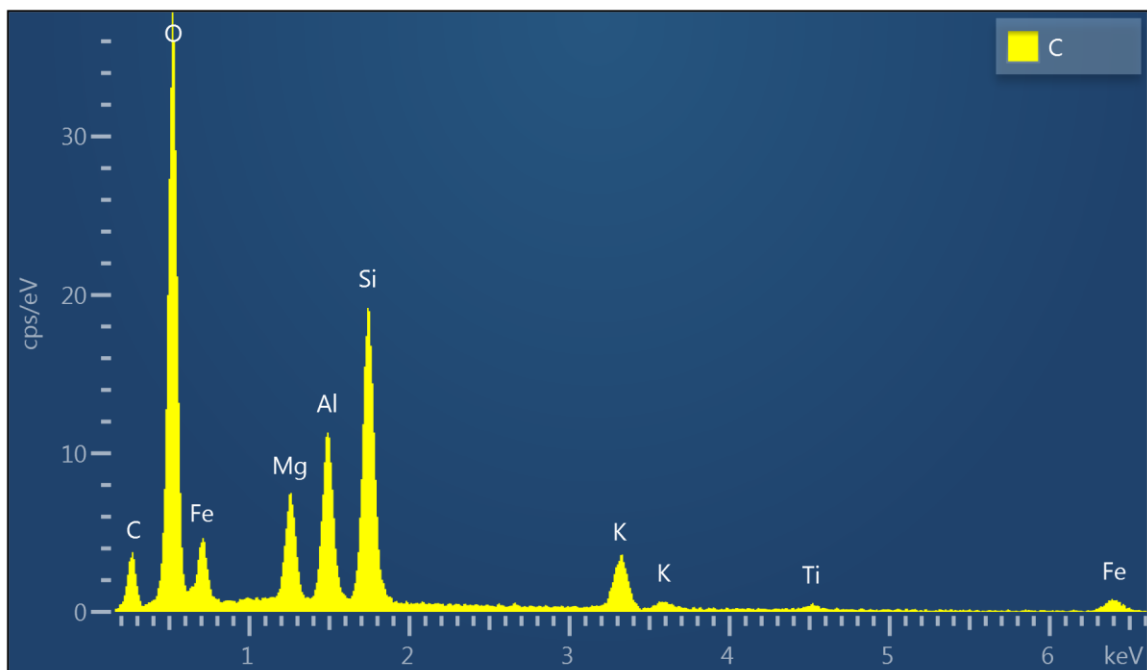
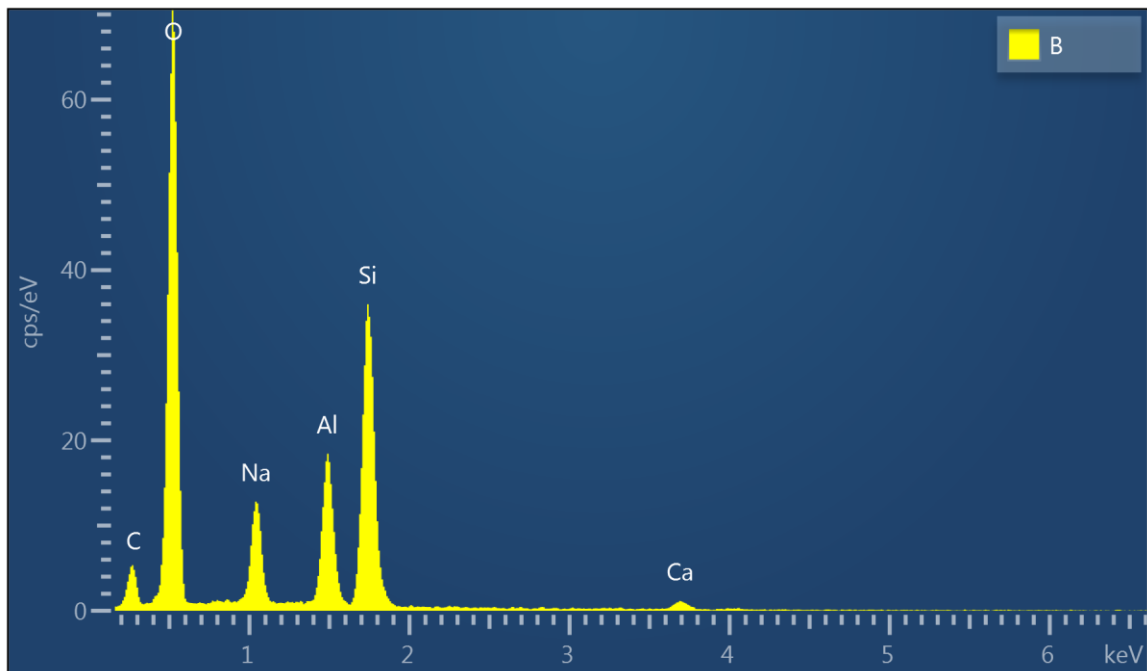


50µm



Kommentar:

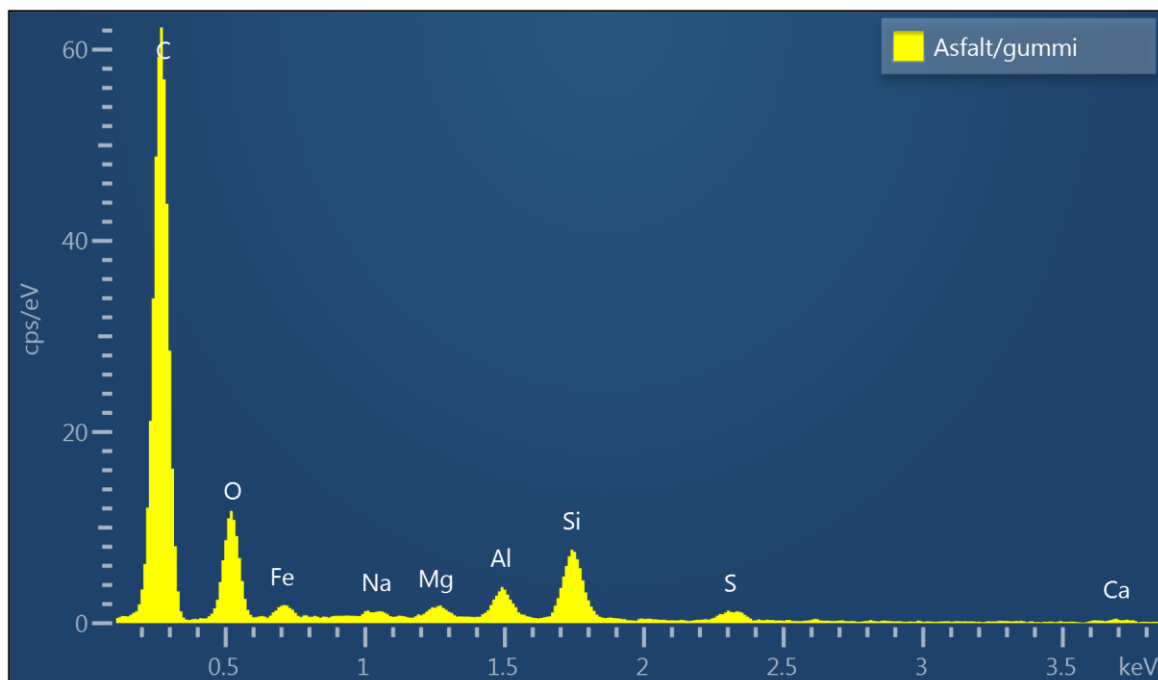
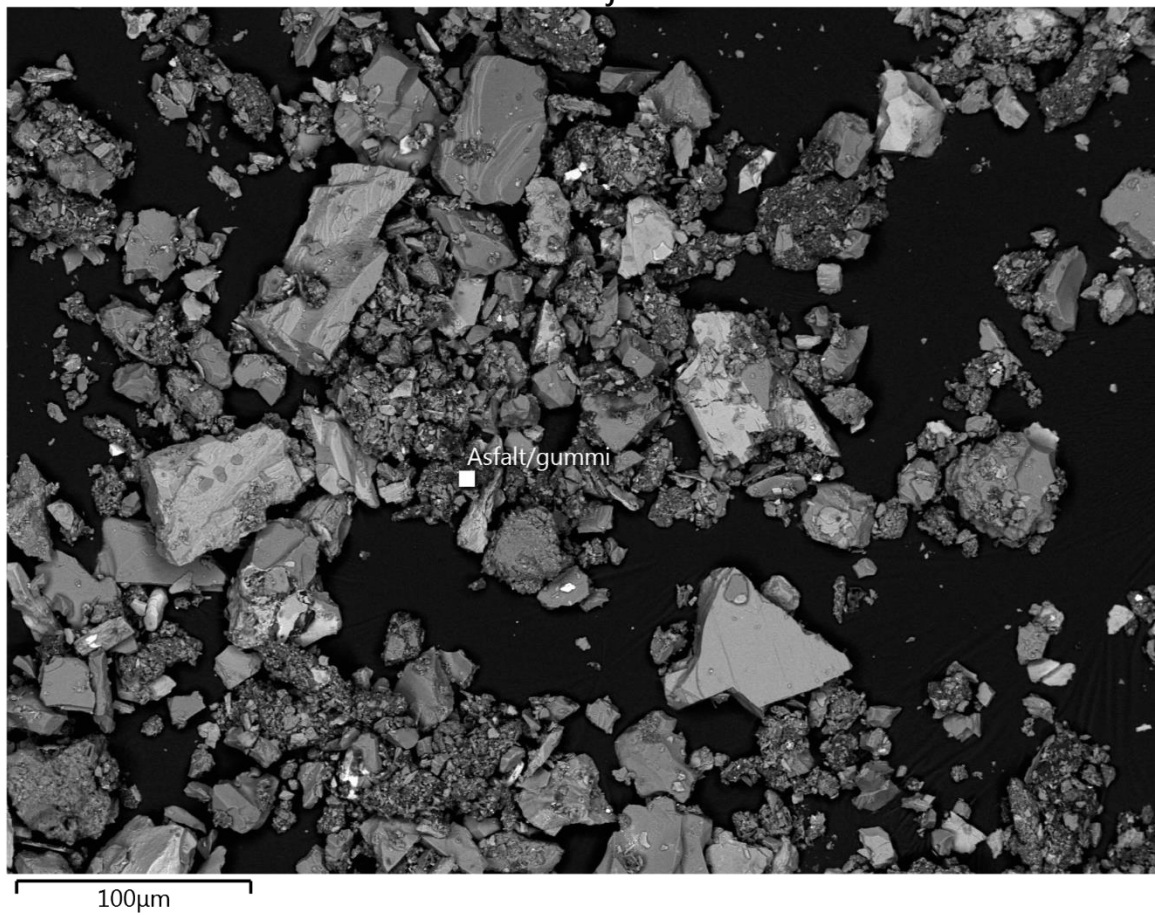
EDS punktanalyser er gjort på enkelt partikler i slammet. Spektra fra partiklene markert med bokstaver, er vist på denne og neste side.



Kommentar:

Mastrafjordtunnelen: Spektrum B er plagioklas (variant av feltspat), som forekommer hyppig i slammet. Partikkeltype C ser nesten ut som et sammendrag av det som er funnet av mineraler i denne prøven.

Mastrafjord



Kommentar:

Mastrafjordtunnelen: Agglomerater av gummi/asfalt med store mengder finfraksjon mineralske partikler innbakt. Slike gummi/asfalt fragmenter er det mye av i begge prøvene.





Statens vegvesen  
Vegdirektoratet  
Publikasjonsekspedisjonen  
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO  
Tlf: (+47 915) 02030  
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

**Trygt fram saman**